

КОРОТКИЕ  
СЕТИ  
И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
ПАРАМЕТРЫ  
ДУГОВЫХ  
ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

СИНДВОЛДЖИ

# КОРОТКИЕ СЕТИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДУГОВЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

## СПРАВОЧНИК

Издание второе,  
переработанное и дополненное

Под редакцией  
канд. техн. наук Я. Б. ДАНЦИСА  
и канд. техн. наук Г. М. ЖИЛОВА



МОСКВА «МЕТАЛЛУРГИЯ» 1987 — 2

**Я. Б. ДАНЦИС, Л. С. КАЦЕВИЧ, Г. М. ЖИЛОВ,  
Н. Н. МИТРОФАНОВ, В. Л. РОЗЕНБЕРГ, И. М. ЧЕРЕНКОВА**

Рецензент канд. техн. наук **В. Л. Рабинович**

УДК 621.365.2

**Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей.** Справ. изд./Данцис Я. Б., Кацевич Л. С., Жилов Г. М. и др./ 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1987. 320 с.

В справочнике систематизированы конструкции, параметры и электрические характеристики коротких сетей действующих руднотермических и сталеплавильных дуговых печей, а также печей стандартного типа. Приведены методы расчета и исследования параметров коротких сетей. Даны примеры расчета параметров и электрических характеристик электродуговых печей.

Предназначается для инженерно-технических работников, занимающихся эксплуатацией, проектированием и исследованием мощных электродуговых печей. Ил. 93. Табл. 59. Библиогр. список: 39 назв.

## СПРАВОЧНИК

**Яков Борисович Данцис, Леонид Саввич Кацевич  
Генрих Моисеевич Жилов, Николай Никитич Митрофанов  
Владимир Львович Розенберг, Ирина Матвеевна Черенкова**

## КОРОТКИЕ СЕТИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДУГОВЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

Редактор издательства **Л. К. Беликов**  
Художественный редактор **Ю. И. Смурыгин**  
Технический редактор **В. М. Курочкина**  
Корректор **Г. Ф. Лопанова**

ИБ № 2849

Сдано в набор 13.02.87. Подписано в печать 24.06.87. Т-16016. Формат бумаги 84×108<sup>1/32</sup>. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 16,8. Усл. кр.-отт. 16,80. Уч.-изд. л. 18,11. Тираж 3150 экз. Заказ 796. Цена 1 р. 20 к. Изд. № 1180.

Ордена Трудового Красного Знамени  
издательство «Металлургия», 119857, ГСП, Москва, Г-34,  
2-й Обыденский пер., д. 14

Владимирская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли 600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

К 2601000000—222  
040(01)—87 20—87

|                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Предисловие                                                                                        | 5   |
| <b>Глава I. Принципиальные схемы коротких сетей и выбор их конфигураций</b>                        |     |
| 1. Схемы коротких сетей                                                                            | 6   |
| 2. Конфигурация коротких сетей руднотермических печей                                              | 9   |
| 3. Схемы и конфигурации коротких сетей дуговых сталеплавильных печей (ДСП)                         | 34  |
| <b>Глава II. Конструктивные решения основных элементов коротких сетей</b>                          |     |
| 1. Контактные соединения                                                                           | 40  |
| 2. Токоведущие детали электрододержателя                                                           | 49  |
| 3. Жесткие участки токопровода                                                                     | 60  |
| 4. Электрическая изоляция токопроводов                                                             | 70  |
| 5. Гибкие участки токопровода                                                                      | 81  |
| 6. Компенсаторы                                                                                    | 91  |
| <b>Глава III. Электрические параметры коротких сетей действующих электродуговых печей</b>          |     |
| 1. Общие положения                                                                                 | 94  |
| 2. Типы действующих руднотермических печей и их общие характеристики                               | 96  |
| 3. Основные конструктивные данные коротких сетей руднотермических печей                            | 110 |
| 4. Реактивные и активные сопротивления руднотермических печей                                      | 121 |
| 5. Электрические характеристики руднотермических печей                                             | 134 |
| 6. Электрические параметры дуговых сталеплавильных печей                                           | 141 |
| <b>Глава IV. Устойчивость проводников короткой сети к токам короткого замыкания</b>                |     |
| 1. Расчет токов короткого замыкания на стороне низшего напряжения печной установки (короткой сети) | 151 |
| 2. Электродинамические усилия в проводниках короткой сети (механический резонанс)                  | 154 |
| 3. Нагрев проводников короткой сети при коротком замыкании                                         | 158 |
| <b>Глава V. Расчет реактивных сопротивлений</b>                                                    |     |
| 1. Общие положения                                                                                 | 160 |
| 2. Жесткие токопроводы коротких сетей                                                              | 183 |
| 3. Подвижная часть короткой сети                                                                   | 209 |
| 4. Электроды и ванна электропечей                                                                  | 213 |
| 5. Примеры расчета реактивных сопротивлений электропечей                                           | 218 |
| 6. Применение ЭВМ при расчете реактивных сопротивлений коротких сетей                              | 234 |
| <b>Глава VI. Расчет активных сопротивлений</b>                                                     |     |
| 1. Сопротивление одиночного проводника                                                             | 240 |
| 2. Сопротивления проводников короткой сети                                                         | 244 |
| 3. Потери энергии в контактных соединениях и электроде                                             | 249 |
| 4. Тепловой расчет проводников короткой сети                                                       | 252 |
| 5. Допустимые нагрузки проводников                                                                 | 257 |



|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6. Пример расчета активного сопротивления короткой сети печи РКЗ-48ф . . . . . | 262 |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|

## **Глава VII. Экспериментальное определение электрических параметров дуговых электропечей**

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Общие положения . . . . .                                                                           | 265 |
| 2. Определение средних значений электрических параметров действующих печей . . . . .                   | 269 |
| 3. Определение мгновенных значений электрических параметров действующих электродуговых печей . . . . . | 272 |
| 4. Определение электрических параметров с помощью опыта короткого замыкания . . . . .                  | 277 |
| 5. Определение электрических параметров коротких сетей с помощью физического моделирования . . . . .   | 279 |

## **Глава VIII. Параметры электропечного контура с установками искусственной компенсации реактивной мощности**

|                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Общие положения . . . . .                                                                            | 284 |
| 2. Влияние поперечной компенсации на режим работы токоприемников . . . . .                              | 292 |
| 3. Влияние продольной компенсации на режим работы крупных токоприемников . . . . .                      | 294 |
| 4. Схемы включения конденсаторных батарей поперечной компенсации . . . . .                              | 296 |
| 5. Схемы включения конденсаторных батарей продольной компенсации . . . . .                              | 300 |
| 6. Рабочие токи и напряжения электропечных агрегатов, оборудованных УПК . . . . .                       | 306 |
| 7. Параметры конденсаторной батареи УПК . . . . .                                                       | 308 |
| 8. Пример расчета параметров электропечного контура и конденсаторной батареи УПК печи РКЗ-80к . . . . . | 316 |
| Библиографический список . . . . .                                                                      | 319 |

Увеличение выплавки электростали в 1,3—1,4 раза, предусмотренное в «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года», требует реконструкции действующих и создания новых мощных руднотермических и сталеплавильных электропечей.

Определение параметров и электрических характеристик при создании мощных электропечей представляет весьма сложную инженерную задачу. При этом наибольшие трудности вызывают определение реактивных сопротивлений и выбор оптимальной конструкции вторичного токопровода.

После выхода первого издания (1974 г.) были введены в эксплуатацию ряд новых электропечей, реконструированы некоторые старые электропечи, а также осуществлены новые исследования в области расчета реактивных сопротивлений, применения ЭВМ для определения параметров и электрических характеристик электропечей. Эти и другие изменения нашли отражение в предлагаемом втором издании справочника, большинство глав которого переработано и дополнено.

Наибольшей переработке подверглись гл. I (п. 3), III, V и VIII. Вновь написана гл. IV. Отдельные главы написаны следующими авторами: I (пп. 1, 2) — Я. Б. Данцисом, Г. М. Жиловым, Н. Н. Митрофановым, И. М. Черенковой; I (п. 3) и II — Л. С. Кацвичем; III (пп. 1—4) — Я. Б. Данцисом, Г. М. Жиловым, Н. Н. Митрофановым, И. М. Черенковой; III (п. 5) — Я. Б. Данцисом, Г. М. Жиловым, Н. Н. Митрофановым, И. М. Черенковой и В. Л. Розенбергом; III (п. 6) — Л. С. Кацвичем; IV — Я. Б. Данцисом, Г. М. Жиловым; V (пп. 1—5) — Я. Б. Данцисом, И. М. Черенковой; V (п. 6) — Я. Б. Данцисом, Г. М. Жиловым; VI — Я. Б. Данцисом, Г. М. Жиловым, И. М. Черенковой; VII — Г. М. Жиловым, Н. Н. Митрофановым; VIII — Я. Б. Данцисом, Г. М. Жиловым.

Авторы выражают благодарность рецензенту канд. техн. наук В. Л. Рабиновичу за замечания по работе, которые способствовали улучшению качества справочника, а также сотрудникам лаборатории ЛенНИИгипрохима В. А. Кольчатовой, И. В. Владимировой, Ю. Ф. Симонову и Г. Д. Головкиной, оказавшим большую помощь в оформлении рукописи и подготовке материалов.

Авторы будут признательны за все замечания и пожелания, которые просят присылать по адресу: 119857, Москва, Г-34, ГСП. 2-й Обыденский пер., д. 14, издательство «Металлургия».

# **ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ КОРОТКИХ СЕТЕЙ И ВЫБОР ИХ КОНФИГУРАЦИИ**

## **1. Схемы коротких сетей**

Короткая сеть является одним из важнейших участков в электрическом контуре печной установки. Короткой сетью или вторичным токоподводом называют совокупность проводников, соединяющих низковольтные выводы источника питания (печного трансформатора) с рабочей зоной электрической печи, включая устройства электрической изоляции, системы охлаждения, конструкции крепления проводников и других элементов. Такое определение свидетельствует о том, что в состав короткой сети включаются не только участки с медными или алюминиевыми токопроводами, но и электроды (та их часть, которая определяет потери энергии) [1].

Различают следующие элементы короткой сети:

а) компенсаторы — гибкие ленты, соединяющие выводы низшего напряжения электропечного трансформатора с неподвижной частью короткой сети. Назначение их — компенсировать изменения линейных размеров проводников неподвижной части короткой сети, возникающих при колебании их температуры, и тем самым ликвидировать механические нагрузки на систему уплотнений выводов низшего напряжения электропечного трансформатора;

б) шинный пакет — наиболее длинная неподвижная часть короткой сети руднотермических электропечей, состоящая либо из прямоугольных шин, либо из водоохлаждаемых трубчатых проводников. В дуговых сталеплавильных печах (ДСП) шинный пакет имеет весьма малую протяженность;

в) неподвижный башмак — для соединения и передачи тока от проводников шинного пакета к гибким проводникам короткой сети;

г) пакет гибких проводников (голых кабелей, гибких лент или водоохлаждаемых кабелей) — для передачи тока от неподвижного башмака к подвижному башмаку, перемещающемуся совместно с электрододержателем. В сталеплавильных печах гибкие проводники одновременно обеспечивают возможность наклона печи для слива металла и шлака. Для ДСП это наиболее существенная часть короткой сети;

д) подвижный башмак — для соединения и передачи тока от пакета гибких проводников к электрододержателю;

е) проводники и токопроводящие конструкции электрододержателя;

ж) контактные щеки (плиты) или головки электрододержателей сталеплавильных печей — для передачи тока от электрододержателя к электроду, обеспечивающие возможность перепуска электрода (относительно конструкции электрододержателя);

з) электроды.

Активные и особенно индуктивные сопротивления короткой сети оказывают определяющее влияние на электрические характеристики электропечной установки. По проводникам короткой сети протекают весьма большие токи промышленной частоты, которые создают вокруг проводников сильные магнитные поля. Вследствие этого особое значение приобретают такие явления, как поверхностный эффект, эффект близости, внешний поверхностный эффект (неравномерное распределение тока по отдельным проводникам), перенос мощности между отдельными проводниками и фазами, потери энергии в металлических конструкциях и др.

Включение в электрический контур печи реактивного сопротивления короткой сети в значительной степени ухудшает электрические характеристики печи и приводит к загрузке источников ее питания большой реактивной мощностью. Эти явления накладывают особые требования к коротким сетям — минимально возможная длина, наиболее рациональная транспозиция проводников, равенство параметров отдельных фаз, минимальные величины активных и реактивных сопротивлений и т. п. Вместе с тем, некоторые печи малой мощности с открытым дуговым разрядом не могут работать при отсутствии в цепи достаточной индуктивности.

Особенности коротких сетей заключаются также в существенном влиянии их параметров на режимы работы электропечных установок и на производительность агрегатов.

В связи с этим создание рациональной конструкции короткой сети является весьма сложной и важной инженерной задачей, решению которой были посвящены многие работы в СССР и за рубежом. Несмотря на то что за последние годы значительно возросла единичная мощность электропечей, наиболее распространенными

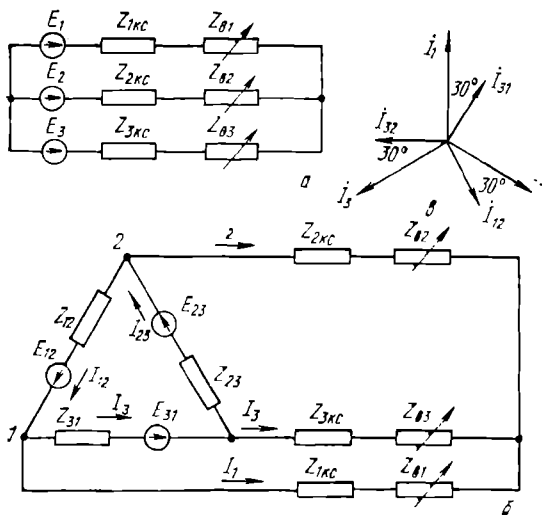


Рис. 1.1. Эквивалентные схемы печных установок:  
 а — звезда; б — треугольник; в — векторная диаграмма

продолжают оставаться трехэлектродные печи со схемами соединений короткой сети: «треугольник» на электродах и «звезда» на трансформаторе. При этом первая схема чаще встречается на печах с круглыми ваннами, а вторая — на печах с прямоугольными ваннами. В связи с ростом мощностей начинают создавать шестиэлектродные печи. Однако короткие сети этих печей часто повторяют элементы трехэлектродных печей.

По проводникам коротких сетей, имеющих схему соединения «звезда», протекают те же токи, что и по электродам печи, а по проводникам коротких сетей, имеющих схему «треугольник», протекают фазные токи, разность которых образует линейные токи в электродах. В зависимости от места соединения в треугольник по части проводников короткой сети могут протекать линейные токи. Эквивалентные схемы печных установок с обеими схемами соединений даны на рис. 1.1.

В зависимости от места соединения проводников или обмоток низшего напряжения трансформатора в нулевую точку различают схемы:

а) звезда на трансформаторе — выводы обмоток низшего напряжения собираются в нулевую точку либо в баке печного трансформатора, либо на его крышке;

б) звезда на печи — проводники, соединенные с началами или концами обмоток низшего напряжения, сходятся в нулевую точку в районе ванны печи.

В случае схемы «треугольник» в каждую ветвь фазы входят не только вторичные обмотки трансформаторного агрегата (как это имеет место у силовых трансформаторов), но также шины и кабели, соединяющие трансформатор с электродами печи. При этой схеме соединения по некоторым проводникам короткой сети протекают фазные токи с противоположными направлениями, что создает для таких конструкций печей возможность лучшей компенсации магнитного потока и значительного уменьшения реактивного сопротивления. В зависимости от места соединения проводников в треугольник различают схемы:

а) треугольник на электродах — местом соединения короткой сети в треугольник является электрододержатель печи, линейные токи текут по электродам к ванне печи;

б) треугольник на шинном пакете — треугольник собирается на неподвижных башмаках гибких проводников короткой сети, линейные токи текут от неподвижных башмаков через гибкие кабели и электроды, к ванне печи;

в) треугольник на гибких кабелях — треугольник собирается на подвижных башмаках гибких проводников. Линейные токи текут от подвижных башмаков через электрододержатель и электроды к ванне печи. Вышеуказанные названия имеют условный характер и в настоящей работе принято в основном название «треугольник» по элементу, на котором заканчивается протекание фазных токов.

Электрические параметры короткой сети зависят не только от выбранной электрической схемы соединения (треугольник или звезда), но и от взаимного расположения ее элементов и их геометрических размеров, т. е. ее конфигурации.

## **2. Конфигурация коротких сетей руднотермических печей**

На рис. 1.2—1.12 представлены основные конфигурации коротких сетей руднотермических печей, которые характеризуются особенностями, изложенными в табл. 1.1.

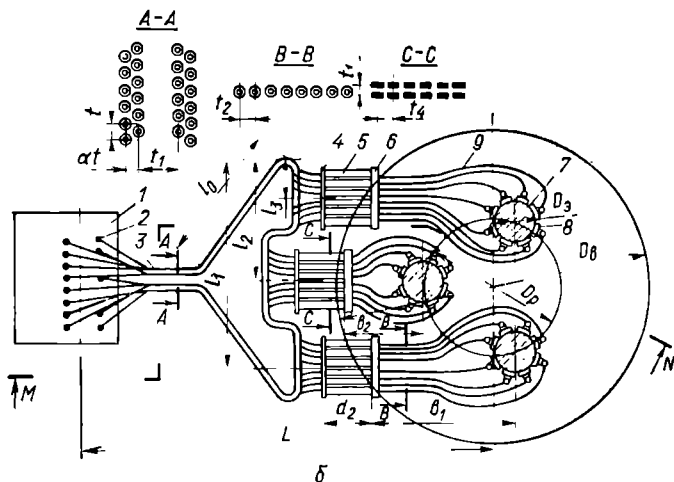
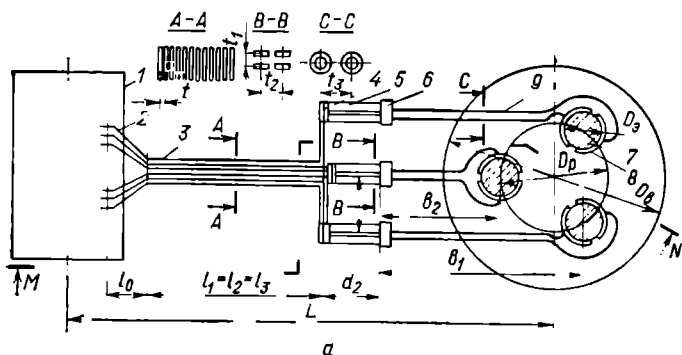


Рис. 1.2. Схема короткой сети трехэлектродной руднотермической печи с круглой ванной:

*a* — звезда на трансформаторе; *б* — треугольник на шинном пакете; 1 — трансформатор; 2 — компенсаторы; 3 — трубчатый пакет; 4 — неподвижный башмак; 5 — гибкий токопровод; 6 — подвижный башмак; 7 — электроды; 8 — контактная плита; 9 — подвижные трубки электрододержателя

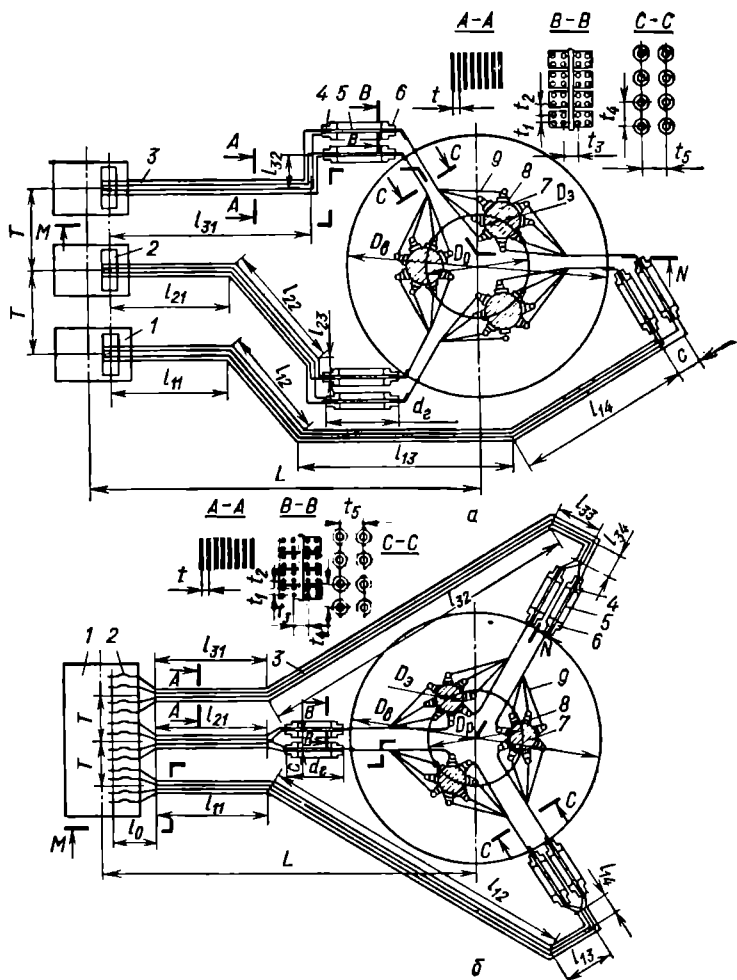


Рис. 1.3. Схема короткой сети (треугольник на электродах) трехэлектродных рудотермических печей с круглой ванной (позиции соответствуют рис. 1.2)



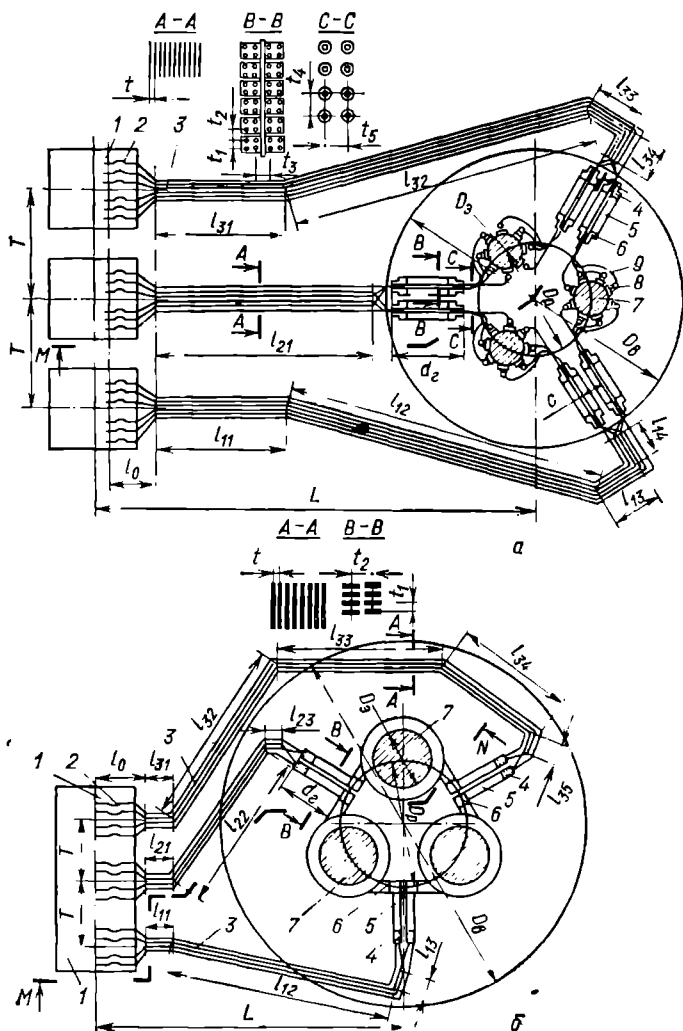


Рис. 1.4. Схема короткой сети трехэлектродной руднотермической печи с круглой ванной (позиции соответствуют рис. 1.2):

*a* — треугольник на электродах; *б* — треугольник на подвижных башмаках

В этой таблице рассмотрены короткие сети печей малой мощности до  $5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ , средней мощности  $5\text{—}20 \text{ МВ} \cdot \text{А}$  и большой мощности выше  $20\text{—}25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ . Конфигурации этих коротких сетей в вертикальной плоскости для различных конструкций печных установок представлены на рис. I.7,б; I.9,в; I.11,б и I.13.

Круглые трехэлектродные печи в начале своего развития оснащались короткими сетями со схемой соединения звезда на трансформаторе с некомпенсированными и резко асимметричными шинными пакетами. Однако большинство современных круглых печей имеет схему соединения треугольник на электродах, что обеспечивает снижение реактивного сопротивления по сравнению со схемой некомпенсирования звезда на трансформаторе. Схема треугольник на электродах бывает с симметрично расположенными фазами, когда оси камер трансформаторов располагаются вокруг печи под углом  $120^\circ$  (см. рис. I.5, а, б), с несимметричными пакетами в том случае, когда выводы всех трех фаз короткой сети сосредоточены в одной камере (см. рис. I.4, а) или каждый трансформатор расположен в отдельной камере (рис. I.5, в). Первая схема обладает полной симметрией электрических параметров отдельных фаз и наименьшим реактивным сопротивлением, но требует прокладки линии высокого напряжения внутри цеха вокруг печи. При применении второй схемы создается незначительная асимметрия сопротивлений отдельных фаз (перекос реактивных сопротивлений примерно на 5 % и полезных мощностей на 2,5 %), а суммарное реактивное сопротивление повышается примерно на 5—7 %. Однако при этом упрощается компоновка цеха и конструкция устройств электроснабжения, что имеет особо важное значение для современных сверхмощных печей, питание которых производится непосредственно от сети с напряжением 110—220 кВ.

Трехэлектродные прямоугольные печи большой мощности работают, как правило, со схемой соединения звезда на трансформаторе. При этом печной трансформатор располагается по большой оси печи (рис. I.9, а).

Такое расположение трансформатора является более предпочтительным, чем его расположение по малой оси (рис. I.8, в), так как обеспечивает уменьшение реактивности установки примерно на 20 %. Применение схемы треугольник на электродах для прямоугольных печей не оправдало себя, так как при этом не достигается ликви-



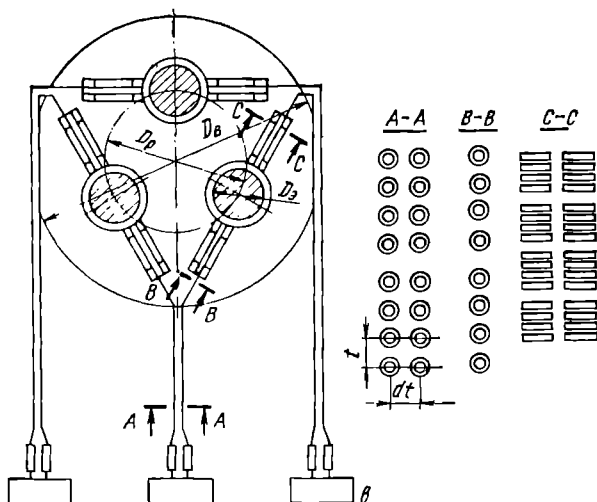


Рис. 1.5. Схема короткой сети (треугольник на подвижных башмаках) трех-электродных руднотермических печей с круглой ванной (позиции соответствуют рис. 1.2)

дация асимметрии реактивных сопротивлений, в то время как дополнительно создаются трудности в управлении печи из-за наличия больших величин токов нулевой последовательности. Шестиэлектродные печи могут иметь две группы из трех электродов или три группы из двух электродов, расположенных в одной круглой или прямоугольной ванне. Иногда их выполняют в виде одной трехфазной группы с расщепленными электродами на две независимые половины.

При наличии групп из трех электродов схемы соединений короткой сети аналогичны трехэлектродным печам, а при наличии групп из двух электродов каждая пара электродов питается от однофазного трансформатора через бифилированную короткую сеть (рис. 1.10) и слияние путей токов отдельных фаз происходит лишь в ванне печи. Некоторые шестиэлектродные печи с трехфазными группами имеют такую транспозицию проводников и электродов, при которой обеспечивается более равномерное распределение мощности в ванне печи (рис. 1.11, 1.12).

К сожалению, до настоящего времени нет установленных и общепринятых положений по выбору того или

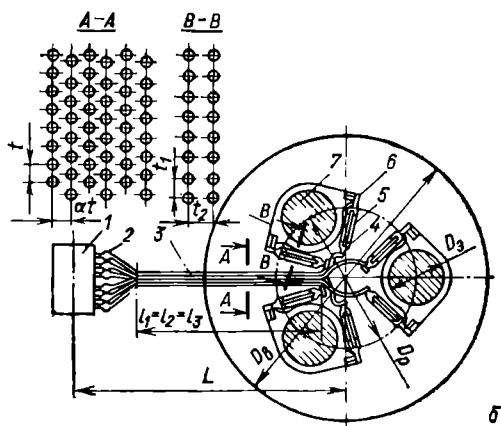
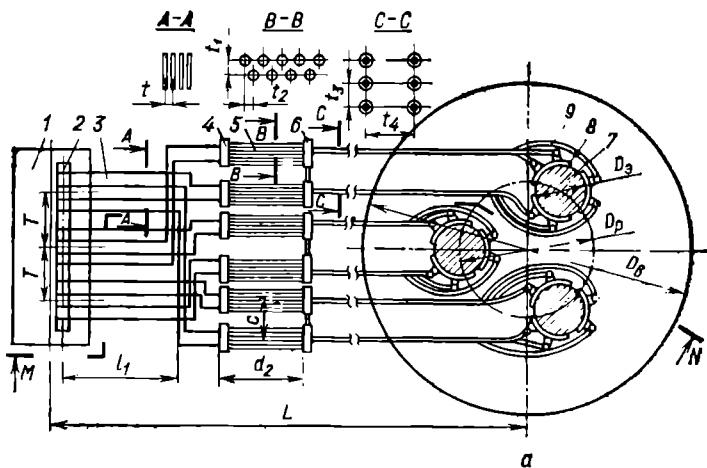


Рис. 1.6. Схема короткой сети трехэлектродных руднотермических печей с круглой ванной (позиции соответствуют рис. 1.2):  
 а — треугольник на подвижных башмаках; б — компенсированная звезда на трансформаторе

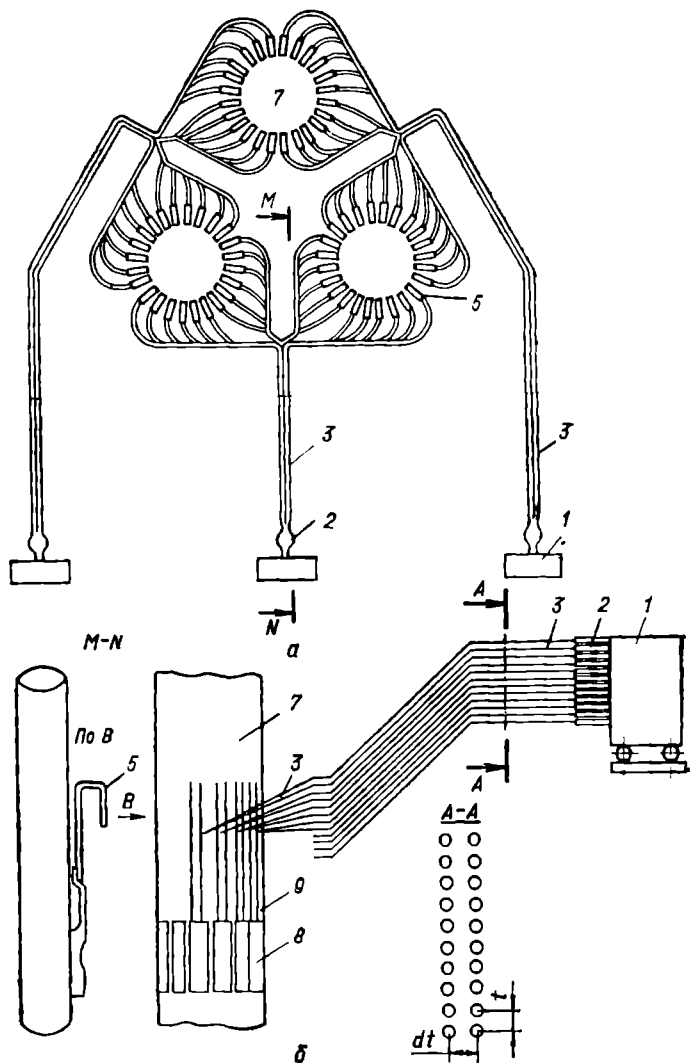


Рис. 1.7. Схема короткой сети с верхним токоподводом трехэлектродной руднотермической печи с круглой вайной (позиции соответствуют рис. 1.2)

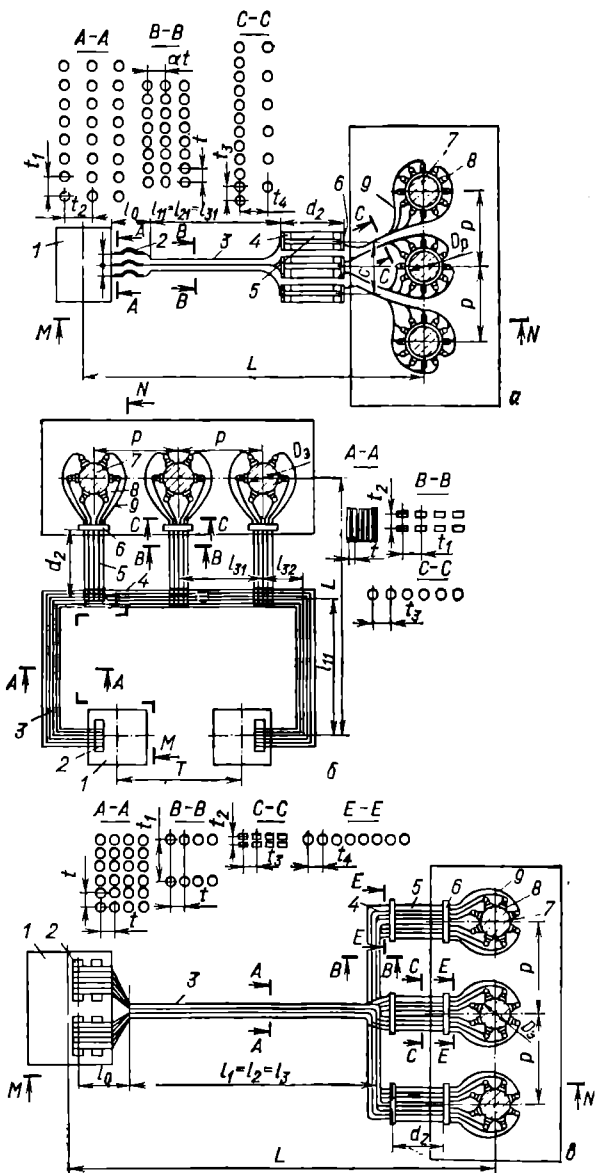


Рис. 1.8. Схема короткой сети трехэлектродной руднотермической печи с прямоугольной ванной:  
 а — звезда на трансформаторе; б — треугольник на подвижном башмаке; в — звезда на трансформаторе (позиции соответствуют рис. 1.2)

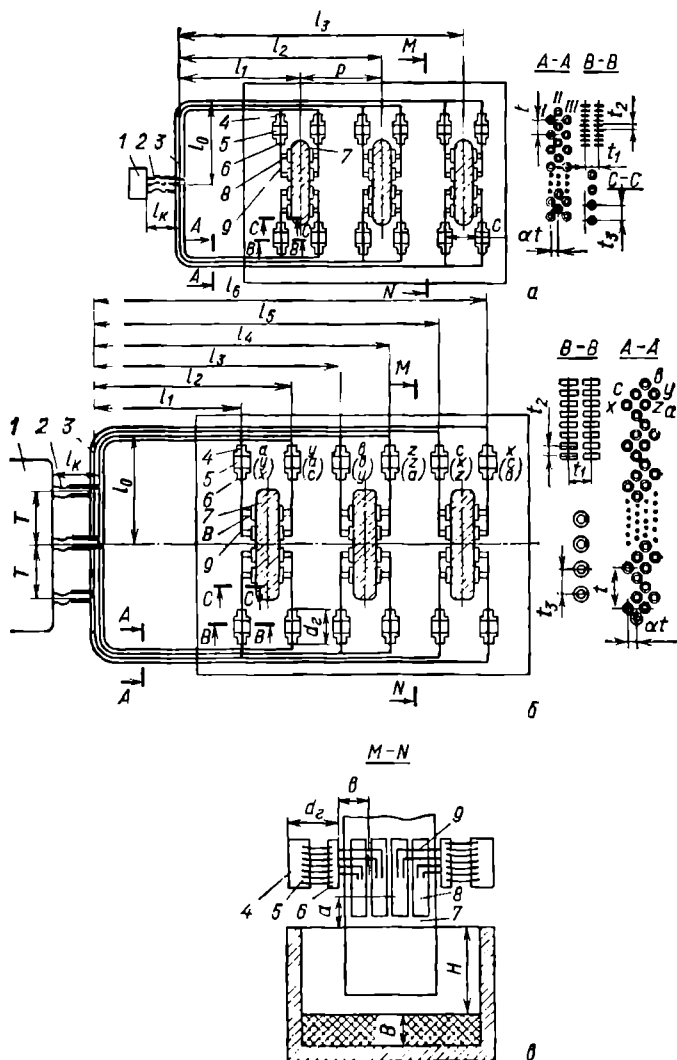


Рис. 1.9. Схема короткой сети трехэлектродной руднотермической печи с прямоугольной ванной:  
 а — звезда на трансформаторе; б — треугольник на электродах (позиции соответствуют рис. 1.2)



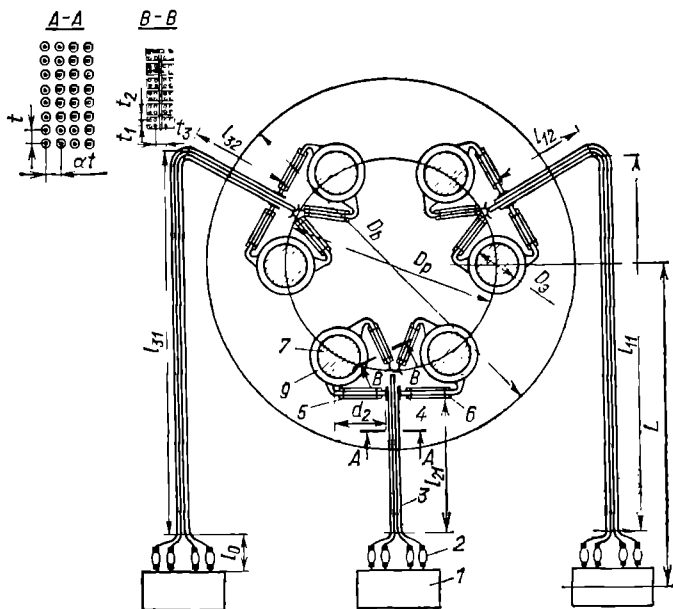


Рис. 1.10. Схема короткой сети шестизлектродной руднотермической печи с круглой ванной (позиции соответствуют рис. 1.2)

инного типа печи или той или иной схемы короткой сети. Например, мощные карбидные печи (40—70 МВ·А) в социалистических странах строились с прямоугольной ванной и в большинстве случаев со схемой соединения короткой сети «звезда» на трансформаторе. За рубежом такие печи строятся с круглой ванной и со схемой соединения «треугольник» на электродах. Фосфорные и ферросплавные печи строятся как полностью симметричными с расположением трех трансформаторов вокруг печи, так и с асимметричной короткой сетью (с одним трехфазным трансформатором, либо с тремя однофазными, расположенными в одной камере).

Для ферросплавных печей применяются схемы треугольник на электрододержателе стак называемым верхним токоподводом, что связано с конструктивными решениями элементов закрытых печей (рис. 1.7). В этих конструкциях жесткий токопровод размещается над вытяжным зонтом и неподвижные башмаки максимально приближены к электродам. Гибкие проводники

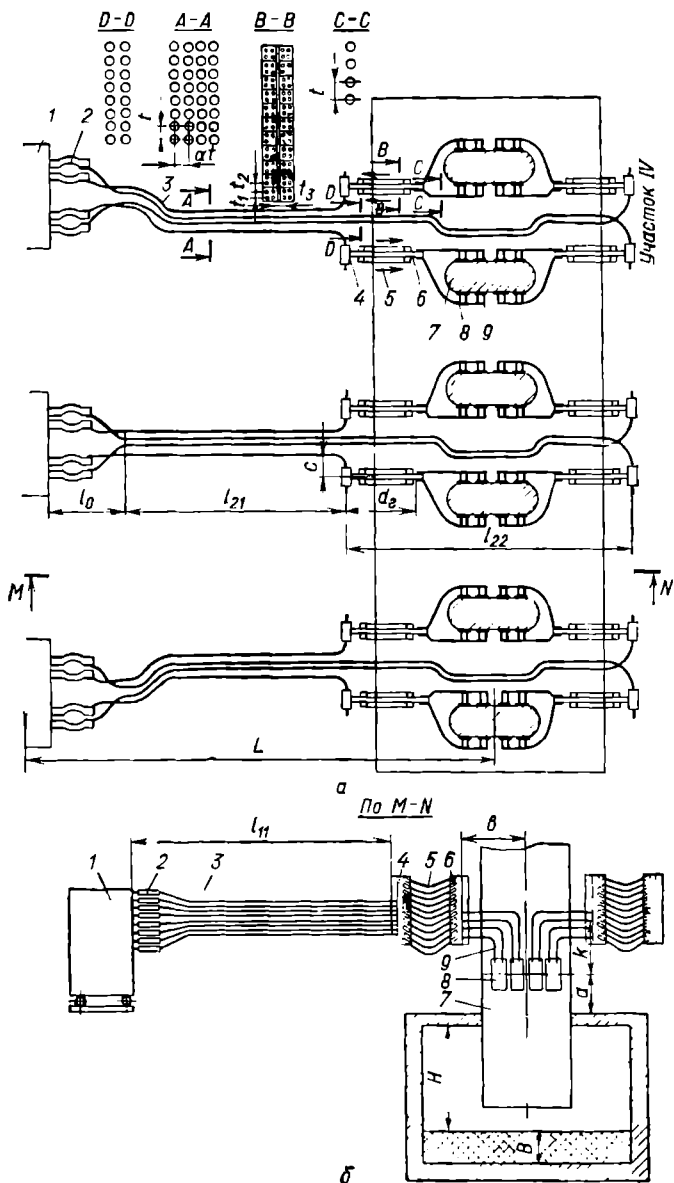


Рис. 1.11. Схема короткой сети шестизлектродной печи с прямоугольной ванной (позиции соответствуют рис. 1.2)

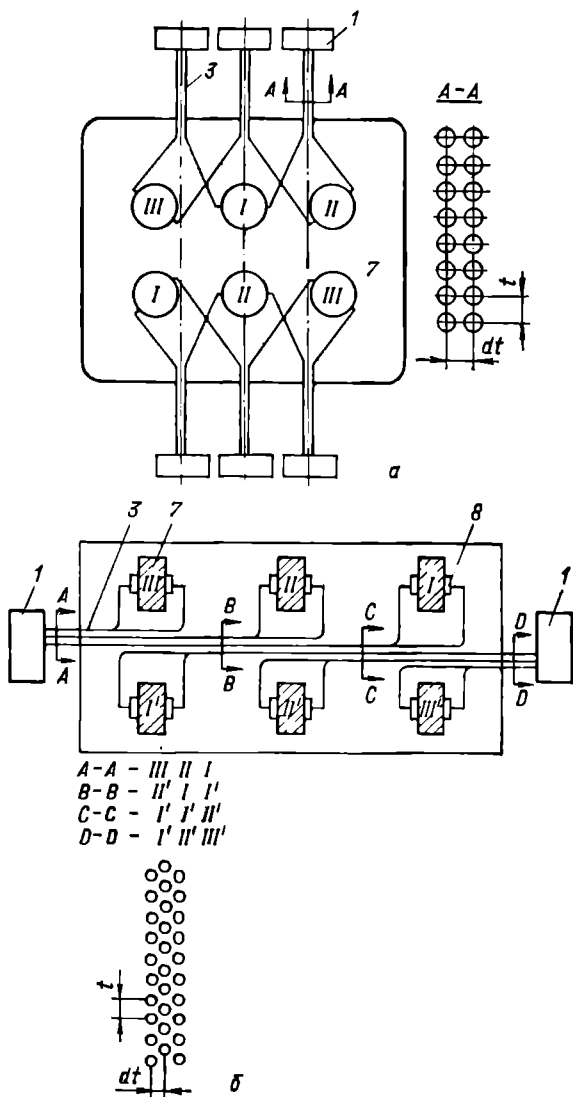


Рис. 1.12. Схемы короткой сети шестизлектродной печи с прямоугольной ванной (позиции соответствуют рис. 1.2):

$a$  — треугольник на подвижных башмаках;  $b$  — звезда на трансформаторе

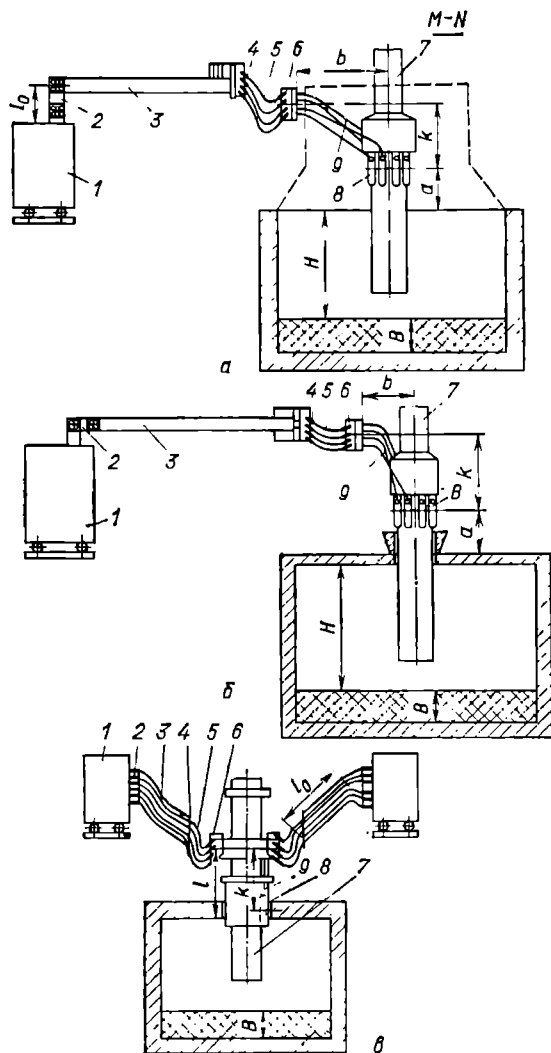


Рис. 1.13. Схемы короткой сети рудотермических печей в вертикальной плоскости:  
*a* - открытая печь; *б* - закрытая печь; *в* - закрытая герметизированная печь (позиции соответствуют рис. 1.2)

## ТИПЫ КОНФИГУРАЦИЙ КОРОТКИХ

| № ря-<br>сунков           | Схема соедине-<br>ния короткой<br>сети | Расположение трансфор-<br>маторов и их особен-<br>ности                                                                        | Особенности шинного<br>пакета                                                                    |
|---------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                         | 2                                      | 3                                                                                                                              | 4                                                                                                |
| <i>А. Трехэлектродные</i> |                                        |                                                                                                                                |                                                                                                  |
| 1.2,а<br>1.13,а           | Звезда на трансформаторе               | Трехфазный трансформатор с двумя группами шихтованных выводов стороны НН                                                       | Трехфазный шихтованный шинный пакет с несимметричной длиной расшихтованной части                 |
| 1.2,б<br>1.13, а          | Треугольник на шинном пакете           | Трехфазный с шихтованными трубчатыми выводами                                                                                  | Трехфазный с водоохлаждаемыми шихтованными трубчатыми проводниками, расположенными в виде «лиры» |
| 1.3,а<br>1.13а            | Треугольник на электродах              | Три однофазных трансформатора, расположенные в одной камере, выводы шихтованы (или один трехфазный трансформатор)              | Однофазное исполнение шихтованного шинного пакета с двумя короткими и одной длинной фазой        |
| 1.3,б<br>1.13,а           | То же                                  | Трехфазный трансформатор с шихтованными выводами, сгруппированными по фазам (или три однофазных трансформатора в одной камере) | Однофазное исполнение шихтованного пакета с двумя длинными и одной короткой фазой                |
| 1.4а<br>1.13,б            | »                                      | Три однофазных трансформатора в одной камере (или один трехфазный трансформатор)                                               | То же                                                                                            |

| Место расположения гибких проводников | Тип электрододержателя | Тип печи, для которой применяется данная конструкция |
|---------------------------------------|------------------------|------------------------------------------------------|
| 5                                     | 6                      | 7                                                    |

*круглые печи*

|                     |                                                                                                                                      |                                                                                                   |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Вне зоны ванны печи | С длинными трубками и вынесенным за пределы ванны подвижным башмаком                                                                 | Открытая круглая печь малой мощности, например, для таких продуктов, как рафинированный феррохром |
| То же               | То же                                                                                                                                | Открытая ферросплавная или карбидная печь средней мощности                                        |
| То же               | То же                                                                                                                                | То же                                                                                             |
| »                   | »                                                                                                                                    | »                                                                                                 |
| Над ванной печи     | С укороченными трубками и подвижным башмаком над ванной печи (или патронного типа), контактные плиты, расположенные над крышкой печи | Закрытые печи средней и большой мощности (или герметизированные фосфорные и карбидные печи)       |

| 1                 | 2                                                    | 3                                                                                                                                                                                      | 4                                                                                                    |
|-------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.4, б<br>1.13, б | Треугольник на подвижных башмаках гибких проводников | Трехфазный трансформатор с шихтованными выводами, сгруппированными по фазам                                                                                                            | Однофазное исполнение шихтованного пакета с одной длинной и двумя короткими фазами                   |
| 1.5, а<br>1.13, в | Треугольник на подвижных башмаках проводников        | Три однофазных трансформатора, расположенных вокруг печи. В последнее время появились конструкции с расположением трансформаторов выше крышки печи с вертикальным жестким токопроводом | Однофазные трубчатые пакеты с водяным охлаждением (или шинные пакеты)                                |
| 1.5, б<br>1.13, в | То же                                                | То же                                                                                                                                                                                  | То же                                                                                                |
| 1.5, в            | То же                                                | Три однофазных трансформатора в одной камере (или один трехфазный трансформатор)                                                                                                       | То же                                                                                                |
| 1.6, а<br>1.13б   | Треугольник на подвижных башмаках гибких проводников | Трехфазный трансформатор с шихтованными выводами, сгруппированными по фазам                                                                                                            | Короткий шинный пакет с расширенной частью                                                           |
| 1.6, б            | Компенсированная звезда                              | Трехфазный трансформатор с двумя группами выводов                                                                                                                                      | Трехфазный пакет с водоохлаждаемыми трубками, имеющими расширенный участок с двухфазной компенсацией |
| 1.7, а<br>1.7, б  | Треугольник на электроде                             | Три однофазных трансформатора, расположенных в одной камере, выводы шихтованы                                                                                                          | Однофазное исполнение шихтованного пакета с двумя и одной короткой фазами                            |

| 5                                                 | 6                                                                                  | 7                                                 |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Над ванной печи                                   | Патронного типа, контактные плиты расположены частично под крышкой печи            | Герметизированные фосфорные и карбидные печи      |
| Над ванной печи параллельно оси трубчатого пакета | Патронного типа, контактные плиты расположены частично под крышкой печи            | Герметизированные фосфорные и карбидные печи      |
| Над ванной печи под углом к оси трубчатого пакета | То же                                                                              | То же                                             |
| То же                                             | То же                                                                              | То же                                             |
| Вне зоны ванны печи                               | С длинными трубчатыми водоохлаждаемыми проводниками                                | Наклоняющиеся печи (например, для белого корунда) |
| Над ванной по радиусам от центра                  | Патронного типа с контактными плитами, расположенными частично под крышкой печи    | Герметизированные фосфорные и карбидные печи      |
| Над ванной печи, с лентами, выгнутыми вверх       | С укороченными трубками (патронного типа) и лентами, идущими параллельно электроду | Закрытые печи большой мощности для ферросплавов   |



| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
|---|---|---|---|

*Б. Трехэлектродные*

|                 |                                  |                                                         |                                                                                 |
|-----------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 1.8а<br>1.13,а  | Звезда на трансформаторе         | Трехфазный трансформатор с шихтованными выводами        | Трехфазный трубчатый пакет                                                      |
| 1.8,б<br>1.13,а | Треугольник на подвижном башмаке | Два трехфазных трансформатора                           | Шихтованный пакет, соединяющий оба трансформатора                               |
| 1.8,в<br>1.13,а | Звезда на трансформаторе         | Трехфазный трансформатор с выводами на крышке           | Трехфазный шихтованный пакет с расшихтовкой, симметричной относительно 2-й фазы |
| 1.9,а<br>1.9,в  | То же                            | Трехфазный трансформатор с боковыми трубчатыми выводами | Трехфазный трубчатый пакет, охватывающий печь с обеих сторон                    |
| 1.9,б<br>1.9,в  | Треугольник на электродах        | Трехфазный с боковыми трубчатыми выводами               | Трехфазный шихтованный трубчатый пакет, охватывающий печь с обеих сторон        |

*В. Шестиэлектродные*

|      |   |                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                       |
|------|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.10 | — | Три однофазных трансформатора, расположенных в одной камере с шихтованными выводами (или три однофазных трансформатора, расположенных по вершинам равностороннего треугольника) | Однофазное исполнение шихтованного пакета с двумя длинными и одной короткой фазой (или однофазное исполнение шихтованного пакета с равными длинами трубчатого пакета) |
|------|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

*Г. Шестиэлектродные*

|                  |   |                                                                                     |                                                                               |
|------------------|---|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 1.11,а<br>1.11,б | — | Три однофазных трансформатора, расположенных в одной камере с шихтованными выводами | Однофазное исполнение шихтованного пакета с равными длинами трубчатого пакета |
|------------------|---|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|

| 5                         | 6                                                                    | 7                                                                    |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <i>прямоугольные печи</i> |                                                                      |                                                                      |
| Все зоны печи             | С длинными трубками и вынесенным за пределы ванны подвижным башмаком | Открытые ферросплавные печи малой мощности                           |
| Частично в зоне печи      | С водоохлаждаемыми трубками, отнесенными от электрода                | Карбидные печи малой мощности                                        |
| Под зонтом печи           | То же                                                                | Карбидные и ферросплавные печи средней мощности                      |
| Под зонтом печи           | С водоохлаждаемыми трубками, отнесенными от электрода                | Открытые и полужакрытые печи большой мощности                        |
| То же                     | То же                                                                | То же                                                                |
| <i>круглые печи</i>       |                                                                      |                                                                      |
| Над крышкой печи          | С укороченными трубками                                              | Закрытые и герметизированная для производства ферросплавов и фосфора |
| <i>прямоугольные печи</i> |                                                                      |                                                                      |
| Над крышкой печи          | То же                                                                | Закрытая для производства ферросплавов и фосфора                     |

| 1       | 2                                                    | 3                                                                                                                                                                            | 4                                                                                           |
|---------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.12, а | Треугольник на подвижных башмаках гибких проводников | Две группы однофазных трансформаторов или два трехфазных трансформатора, расположенных в двух камерах, находящихся с диаметрально противоположных сторон поперечной оси печи | Однофазное исполнение шихтованного пакета с симметричной расшивкой                          |
| 1.12, б | Звезда на трансформаторе [2]                         | То же                                                                                                                                                                        | Трехфазное исполнение шихтованного пакета с частичной компенсацией и симметричной расшивкой |

выполняются либо традиционной конструкции, либо с медными лентами, выгнутыми кверху и соединенными непосредственно с контактными плитами [3]. Для открытых печей принимают эту же схему с глубоким боковым вводом шинпровода, в которых снижение реактивного сопротивления достигается за счет рационально выполненной расшивки пакета. Применение этих схем позволяет снизить реактивное сопоставление на  $\approx 10\%$  по сравнению с традиционными конструкциями [4].

Следует отметить, что весьма трудно составить единые положения по выбору схемы и конструкции вторичного токопровода, и в каждом конкретном случае имеется несколько альтернативных решений. Необходимо выбирать наиболее рациональную схему и конструкцию короткой сети, обеспечивающие наилучшие технико-экономические показатели печной установки.

Каждая схема печи и короткой сети имеет свои преимущества и недостатки и выбор той или иной схемы зависит от конкретных условий — вида производимого продукта, мощности печи, электроснабжения, типа используемого трансформатора, величин активных и реактивных потерь, удобств эксплуатации короткой сети и т. д. Поэтому выбору той или иной конструкции электропечного агрегата должна предшествовать соответствующая работа по анализу возможных вариантов.

| 5                | 6               | 7                                                                               |
|------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Над крышкой печи | Патронного типа | Полузакрытые и закрытые печи большой мощности для ферросплавов, карбида кальция |
| То же            | То же           | То же                                                                           |

Здесь целесообразнее дать лишь общие рекомендации и положения по выбору тех или иных схем короткой сети. При этом имеется в виду, что известны общие требования, обеспечивающие уменьшение реактивного и активного сопротивлений проводников короткой сети, основными из которых являются:

а) исполнение проводников минимально возможной длины;

б) проводники с токами противоположного направления или относящиеся к разным фазам должны располагаться ближе друг к другу (с учетом требуемых расстояний для надежной работы электрической изоляции);

в) проводники одной и той же фазы с одинаковым направлением токов должны располагаться возможно дальше друг от друга (с учетом требований создания рациональной по габаритам конструкции);

г) конфигурация проводников отдельных фаз (включая электроды) должна обеспечивать минимальную асимметрию для предотвращения явления «дикий» и мертвой» фазы.

Выбор конкурентоспособных вариантов конфигурации коротких сетей руднотермических печей следует проводить в соответствии с рекомендациями табл. I.1 и с учетом следующих положений:

1. Оптимальные варианты печных установок большой

мощности с прямоугольной ванной как со схемой соединения звезда на трансформаторе, так и со схемой треугольник на электродах имеют практически одинаковые средние значения реактивных сопротивлений на фазу и достигают (0,75—0,80) мОм для печей большой мощности и (1,10—1,20) мОм для печей средней мощности.

2. Оптимальные варианты печных установок средней и большой мощности с круглой ванной и схемой соединения короткой сети треугольник на электродах имеют несколько большее значение реактивного сопротивления на фазу, чем печи с прямоугольной ванной (для ферросплавных и карбидных печей 0,85—0,95 мОм).

Необходимо отметить, что для закрытых печей при схеме соединения короткой сети компенсированная звезда на трансформаторе можно получить такой же порядок среднего значения реактивного сопротивления на фазу, как и для короткой сети со схемой соединения треугольник на электродах. При этом обеспечивается практически равномерное распределение полезных мощностей по фазам.

3. Реактивное сопротивление электродов и расплава составляет величину порядка 30—60 % от общей величины реактивного сопротивления и возрастает с ростом мощности электропечей. Величины реактивных сопротивлений электропечей падают с возрастанием мощности, а для печей мощностью 20—60 МВ·А практически остаются без изменения. При дальнейшем увеличении мощностей реактивные сопротивления несколько возрастают. Величины активных сопротивлений, определяющих потери, незначительно изменяются в зависимости от мощности. При установке токопровода с соединением в треугольник на электродах сечение токопровода повышается на 16 % по сравнению с сечением короткой сети, имеющей схему звезда на трансформаторе.

4. Явление «дикий» и «мертвой» фазы отсутствует полностью у симметричных печей и незначительно выражено у печей с круглой ванной при одностороннем расположении трансформаторов. Это явление весьма резко выражено у печей с прямоугольной ванной. Однако следует иметь в виду, что для мощных печей с прямоугольной ванной в тех случаях, когда требуется применение искусственной компенсации реактивной мощности для повышения  $\cos \varphi$ , конденсаторы можно включить по специальной схеме, обеспечивающей полное или частичное выравнивание мощностей под электродами [5].

5. Значительная часть активных потерь приходится на переходные сопротивления контактных щек и электродов (на участках, определяющих потери).

6. Печи с прямоугольной ванной обладают рядом преимуществ в смысле облегчения загрузки и слива, но менее совершенны с электротехнической точки зрения.

7. Величины токов и фазного напряжения данного электрода при соединении вторичных обмоток трансформатора в звезду мало зависят от токов и напряжений других электродов, что значительно облегчает ведение технологического процесса и обеспечение рациональных электрических режимов в отличие от схемы соединения обмоток треугольник на электродах, при которой изменение токов и напряжений в одной фазе или электроде вызывает резкое изменение в других.

8. При выборе варианта схемы короткой сети треугольник на электродах для печи с круглой ванной следует учитывать особенности электроснабжения мощных печных установок. Электроснабжение мощных печных установок в ряде случаев оказывается более целесообразным непосредственно от сетей с напряжением 110—220 кВ. Это может привести к необходимости отказаться от полностью симметричной схемы короткой сети и целесообразности применения варианта расположения трансформаторов в одной камере.

9. При расположении трансформаторов с одной стороны печи в ряде случаев может оказаться более целесообразным применение трехфазного трансформатора (особенно при большом числе печей в цехе). В последнее время для ферросплавных печей средней и большой мощности нашла применение конфигурация коротких сетей с верхним токопроводом (рис. 1.7, а). Применение этих схем позволяет снизить индуктивное сопротивление на 10—15 % по сравнению с традиционно применяемыми. Кроме того, для закрытых ферросплавных печей могут успешно применяться схемы с глубоким боковым вводом шинопровода.

Из вышеизложенного следует, что окончательный выбор рациональной схемы короткой сети и конструкции ванны может быть осуществлен только после тщательного анализа конкретных условий производства. Выбор конкурентоспособных вариантов должен быть выполнен с учетом приведенных выше рекомендаций.

### 3. Схемы и конфигурации коротких сетей дуговых сталеплавильных печей (ДСП)

Дуговые сталеплавильные печи имеют круглой формы ванну и расположенные в ней по равностороннему треугольнику три графитированных электрода круглого поперечного сечения.

Вторичные обмотки печного трансформатора обычно соединяются в треугольник. Это соединение может осуществляться: а) внутри трансформатора; б) на неподвижных башмаках короткой сети; в) на подвижных башмаках короткой сети; г) на электродах. В зависимости от этого различные схемы коротких сетей ДСП следует классифицировать таким образом: схема с линейными токами от выводов трансформатора (треугольник внутри трансформатора); схема с линейными токами от неподвижных башмаков (треугольник на неподвижных башмаках); схема с линейными токами от подвижных башмаков (треугольник на подвижных башмаках); схема с линейными токами только в электродах (треугольник на электродах).

Перечисленные выше основные схемы коротких сетей ДСП и их разновидности по исполнению показаны на рис. 1.14, а их основные особенности и области применения приведены в табл. 1.2 [6].

Простейшей в изготовлении и наиболее надежной в эксплуатации является короткая сеть по схеме «треугольник внутри трансформатора» (рис. 1.14, а).

Повышенная надежность короткой сети по этой схеме обусловлена отсутствием электрической изоляции между отдельными проводниками тока в шинном пакете, в кабельной гирлянде и в токопроводе на рукавах электрододержателей (требуется изоляция проводников только от земли).

Кроме того эта схема требует меньше проводниковых материалов, поскольку при прочих равных условиях для канализации шести фазных токов суммарное сечение токопровода должно быть ориентировочно на 15 % больше, чем для трех линейных токов.

Необходимым условием для выполнения короткой сети по такой схеме является вывод линейных токов на вторичной стороне печного трансформатора.

Все остальные схемы короткой сети возникли в результате стремления (далеко не всегда обоснованного) снизить индуктивное сопротивление вторичного токопро-

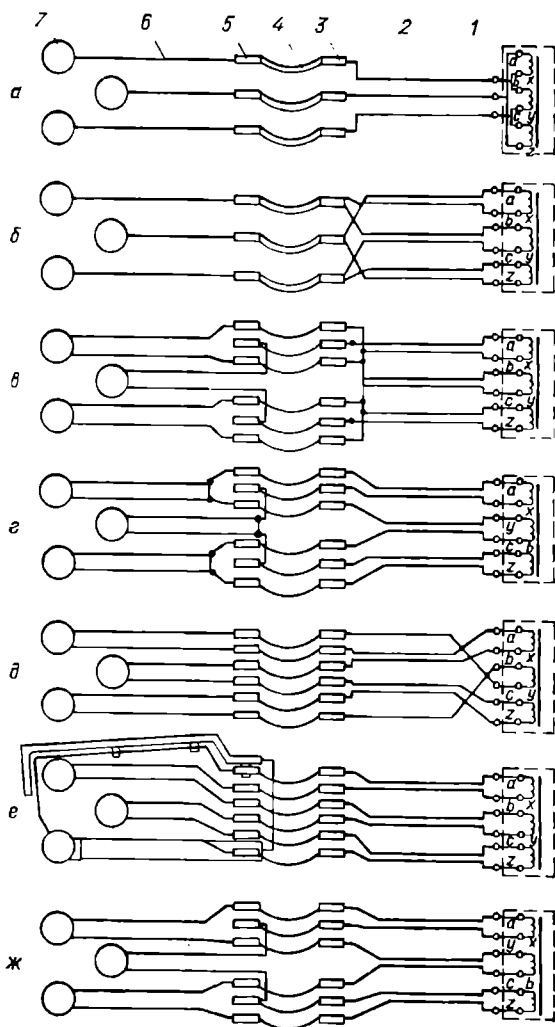


Рис. 1.14. Схемы короткой сети трехэлектродной сталеплавильной печи:  
 1 — трансформатор; 2 — шинный пакет; 3 — неподвижный башмак; 4 — гибкие кабели; 5 — подвижный башмак; 6 — трубы электрододержателей; 7 — электрод



## ТИПЫ И КОНФИГУРАЦИИ КОРОТКИХ СЕТЕЙ ДСП

| № рис.   | Схема короткой сети                                                                                | Шинные пакеты | Особенности кабельных гирлянд                            | Область применения в отечественной практике                  |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1. 14, а | Треугольник внутри трансформатора                                                                  | Нешихтованные | По каждой из трех гирлянд течет линейный ток             | ДСП вместимостью 0,5—3 т                                     |
| 1. 14, б | Треугольник на неподвижных башмаках в трехпроводном исполнении                                     | Шихтованные   | По каждой из трех гирлянд течет линейный ток             | ДСП-100НЗА,<br>ДСП-100И6, ДСП-100И7                          |
| 1. 14, в | Треугольник на неподвижных башмаках в шестипроводном исполнении («расщепленная звезда»)            | »             | По каждой из шести гирлянд течет половина линейного тока | ДСП-100, ДСП-200                                             |
| 1. 14, г | Треугольник на подвижных башмаках                                                                  | »             | По каждой из шести гирлянд течет фазный ток              | —                                                            |
| 1. 14, д | Треугольник на электродах в двухбифилярном исполнении                                              | »             | То же                                                    | ДСП вместимостью от 6 до 100 т                               |
| 1. 14, е | Треугольник на электродах в трехбифилярном исполнении                                              | »             | »                                                        | ДСП вместимостью 5, 20, 35 и 200 т. Не применяется с 1971 г. |
| 1. 14, ж | Треугольник на электродах с расположением башмаков среднего рукава между башмаками крайних рукавов | »             | »                                                        | Печь 6ДСП-100Э                                               |

вода за счет расположения проводников различной полярности на возможно малом расстоянии. При этом требуется надежная электрическая изоляция проводников друг от друга и обеспечение стабильного взаимного расположения кабельных гирлянд гибкой части токопровода.

Схема с линейными токами от неподвижных башмаков (треугольник на неподвижных башмаках) может иметь два существенно различных вида: а) с обычным трехпроводным исполнением кабельных гирлянд; б) с шестипроводным исполнением кабельных гирлянд, причем по каждой гирлянде течет половина линейного тока (эта схема носит название «расщепленная звезда»).

Конструктивной особенностью шестипроводного исполнения схемы «треугольник на неподвижных башмаках» является размещение двух подвижных башмаков среднего электрододержателя в промежутках между башмаками крайних электрододержателей, что вызывает определенные сложности в изготовлении и в обслуживании печи.

На рис. I.14, б показана схема короткой сети «треугольник на неподвижных башмаках» в обычном трехпроводном исполнении, которое имеет две разновидности по конфигурации — копланарную (с линейным расположением в поперечном сечении проводников разных фаз) и триангулированную (с размещением проводников разных фаз в поперечном сечении по вершинам равнобедренного или равностороннего треугольника).

При копланарной конфигурации имеет место различие (асимметрия) индуктивных сопротивлений токопроводов средней и любой из крайних фаз. Для установок ДСП малой вместимости это практически не имеет значения, поскольку в них доля индуктивности всей короткой сети в общей индуктивности печного контура, включая печной трансформатор и дроссель, весьма невелика. Для установок ДСП средней и особенно большой вместимости асимметрия индуктивных сопротивлений печного контура приводит к значительной неравномерности выделения полезных мощностей фаз и в конечном счете к снижению производительности печей. В этих условиях целесообразна триангулированная конфигурация, причем такое расположение может применяться для участков токопровода на рукавах электрододержателей, для кабельных гирлянд, а в некоторых случаях и для ошинов-

ки от вторичных выводов печного трансформатора до неподвижных башмаков (для шинного моста).

Схема короткой сети «треугольник на неподвижных башмаках с шестипроводным исполнением кабельных гирлянд» приведена на рис. 1.14, в.

Английской фирмой Бирлек запатентована короткая сеть по схеме с линейными токами от подвижных башмаков, т.е. треугольник на подвижных башмаках (рис. 1.14, г). С целью уменьшения асимметрии индуктивных сопротивлений фаз при копланарном расположении проводников короткой сети токоведущие трубы на рукавах электрододержателей по этому патенту располагаются по-разному: на среднем рукаве трубы сдвинуты почти вплотную, а на крайних рукавах — раздвинуты по высоте на весьма значительное расстояние.

При создании первых отечественных ДСП вместимостью 80—100 т во второй половине 50-х годов, с целью снижения индуктивного сопротивления и уменьшения степени его асимметрии по фазам, взамен обычной схемы короткой сети с линейными токами от неподвижных башмаков (треугольник на неподвижных башмаках), была предложена и осуществлена схема, получившая наименование «несимметричный треугольник на электродах», с бифилярным расположением двух из трех пар фазных участков токопровода — гирлянд гибких кабелей и труб на рукавах электрододержателей (рис. 1.14, д). Как показал опыт применения ее на ДСП вместимостью 100 и 200 т, эта схема проявила некоторые преимущества перед обычной схемой как в части снижения среднего индуктивного сопротивления, так и в отношении его асимметрии.

В порядке модернизации ряда действующих ДСП вместимостью 100 и 200 т на отечественных металлургических заводах эта двухбифилярная схема была заменена схемой «треугольник на неподвижных башмаках в шестипроводном исполнении» (рис. 1.14, в), что дало заметное снижение среднего индуктивного сопротивления и степени его асимметрии по фазам. Однако ожидаемые по расчетам электротехнические преимущества этой схемы не были достигнуты из-за раскачивания кабельных гирлянд, а также из-за изменения их формы и взаимного расположения под действием электродинамических сил.

На некоторых отечественных ДСП различной вместимости (от 5 до 200 т) была опробована трехбифилярная

схема короткой сети с четвертым рукавом, перемещающимся одновременно с первым (рис. I.14, е), однако эта схема привела к существенному усложнению обслуживания печей и от нее пришлось отказаться.

На рис. I.14, ж приведена схема короткой сети «треугольник на электродах», принятая в конструкции печи 6ДСП—100Э. Сложность осуществления этой схемы заключается в размещении подвижных башмаков среднего электрододержателя в промежутках между башмаками крайних электрододержателей (как и в схеме на рис. I.14, в).

В целях снижения асимметрии индуктивности фаз современных мощных и сверхмощных ДСП и для обеспечения стабильности величин индуктивности при колебаниях рабочего тока короткие сети их выполняются, как правило, по схеме «треугольник на неподвижных башмаках» с триангулированным расположением токопроводов с линейными токами в кабельных гирляндах и на рукавах электрододержателей. При этом, в отличие от устаревших конструкций гирлянд из большого количества кабелей сечением 500—1000 мм<sup>2</sup>, современные гирлянды выполняются из небольшого количества массивных водоохлаждаемых кабелей (обычно не более четырех кабелей на линейный ток печи), что препятствует существенному отклонению кабелей от проектного их расположения при протекании тока. Так, например, в печи ДСП—100И6 с максимальным рабочим током 80 кА гибкий участок вторичного токопровода выполнен тремя гирляндами с четырьмя водоохлаждаемыми кабелями типа КСВДСП—4000 в каждой гирлянде.

Триангулированное расположение токопроводов сверхмощных ДСП большой емкости обладает дополнительным преимуществом в сравнении с копланарным в части снижения влияния сил электродинамического взаимодействия токов разных фаз (в частности, за счет уменьшения горизонтальных составляющих усилий между токоведущими трубами на разных рукавах электрододержателей).

Из рассмотрения различных схем и конструктивных исполнений коротких сетей ДСП можно сделать следующие выводы:

Наиболее простой и экономичной в изготовлении при высокой надежности в эксплуатации является короткая сеть по схеме с линейными токами от выводов трансформатора с копланарным расположением токопроводов.

Такая схема безусловно предпочтительна для печей малой вместимости (до 6 т включительно), в которых асимметрия индуктивности короткой сети по фазам не имеет практического значения. Препятствием к ее осуществлению обычно является конструкция печного трансформатора с выводом на вторичной стороне начал и концов обмоток фаз (в таких случаях должна приниматься схема «треугольник на неподвижных башмаках» в трехпроводном исполнении).

Для печей средней вместимости (12—50 т) в зависимости от конкретных условий (в первую очередь — уровня удельной мощности печи) следует, наряду с копланарным расположением токопроводов, рассматривать варианты их триангулированного расположения в тех же схемах.

Для печей большой вместимости (100 т и выше), наряду со схемами «треугольник внутри трансформатора» и «треугольник на неподвижных башмаках» в триангулированных исполнениях, могут рассматриваться шестипроводные схемы по рис. 1.14, в, г и ж, причем, помимо подробных расчетов индуктивностей в этих вариантах, необходима тщательная конструктивная их проработка с решением вопроса обеспечения стабильности величин индуктивности при резких изменениях рабочих токов в широком диапазоне.

Таким образом, применение шестипроводных схем может быть оправдано лишь в тех случаях, когда более простые трехпроводные схемы не могут обеспечить необходимые электрические параметры установки печи.

## Глава II



# КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОРОТКИХ СЕТЕЙ

## 1. Контактные соединения

Контактные соединения представляют собой разъемные стыки отдельных участков короткой сети. От качества и надежности работы контактов силового токопровода в значительной мере зависит бесперебойная работа дуговой печи. Конструкция контактных соединений должна обеспечивать необходимое усилие сжатия при различ-

ных режимах токовой нагрузки и отвод выделяющегося в зоне контакта тепла без перегрева контактного узла.

Переходное сопротивление контактного соединения зависит в основном от материала, формы и состояния поверхностей контактирующих деталей, а также от усилия сжатия.

Данные для расчета переходного сопротивления контактов приведены в [6].

Величина переходного сопротивления контакта в значительной мере влияет на температуру контактного соединения. Ниже на конкретном примере рассмотрено влияние токовой нагрузки и конструктивных факторов на тепловой режим контактного узла.

Примем, что контактное соединение состоит из двух медных шин сечением  $b \times d = 300 \times 12$  мм, стянутых внахлест на длине  $l = 100$  мм тремя болтами с расчетным усилием сжатия 2 кН на 1 болт.

Переходное сопротивление контакта, рассчитанное по методике, изложенной в [6], составляет  $R_k = 0,8 \cdot 10^{-6}$  Ом. Допустимую токовую нагрузку медной шины сечением  $300 \times 12$  мм можно принять  $I = 6000$  А. Мощность электрических потерь в переходном сопротивлении контакта

$$P_k = I^2 R_k = 28,8 \text{ Вт.}$$

Мощности электрических потерь в медной шине в зоне контакта, ограниченной длиной нахлестки 100 мм.

$$P_{ш} = I^2 \rho_m l / S = 20,6 \text{ Вт.}$$

Суммарная мощность электрических потерь контактного соединения

$$P_{\text{пот}} = P_k + P_{ш} = 28,8 + 20,6 = 49,4 \text{ Вт.}$$

Эта мощность выделяется в окружающую среду за счет конвекции и излучения с теплоотдающей поверхности

$$F = 2bl + 2bd + 4ld = 0,072 \text{ м}^2.$$

т. е. удельная мощность составляет

$$P_0 = P/F = 0,69 \text{ кВт/м}^2.$$

Для определения установившейся температуры контактного соединения воспользуемся зависимостью теплоотдающей способности от температуры поверхности (см. табл. 2.1). Теплоотдаче  $0,69 \text{ кВт/м}^2$  соответствует температура поверхности около  $73^\circ\text{C}$  (находится методом интерполяции).

В рассмотренном примере большая часть электрических потерь контактного соединения обусловлена переходным сопротивлением контакта, величина которого может быть значительно снижена за счет существенного увеличения усилия сжатия.

Предельно допустимая температура контактного соединения должна приниматься заведомо ниже температу-

ТАБЛИЦА 21

КОЭФФИЦИЕНТЫ СУММАРНОЙ ТЕПЛОТДАЧИ ИЗЛУЧЕНИЕМ  
И КОНВЕКЦИЕЙ И МОЩНОСТЬ ТЕПЛОТДАЧИ В ОКРУЖАЮЩУЮ  
СРЕДУ С ТЕМПЕРАТУРОЙ 20 °С

| Темпера-<br>тура по-<br>верхности,<br>°С | Коэффициент<br>теплотдачи<br>$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) | Мощность<br>теплот-<br>дачи $P_0$ ,<br>кВт/м <sup>2</sup> | Темпера-<br>тура по-<br>верхности,<br>°С | Коэффициент<br>теплотдачи<br>$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) | Мощность<br>теплотда-<br>чи $P_0$ ,<br>кВт/м <sup>2</sup> |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 25                                       | 8,8                                                            | 0,044                                                     | 140                                      | 16,8                                                           | 2,020                                                     |
| 30                                       | 9,6                                                            | 0,096                                                     | 160                                      | 17,9                                                           | 2,500                                                     |
| 40                                       | 10,5                                                           | 0,210                                                     | 180                                      | 19,2                                                           | 3,070                                                     |
| 50                                       | 11,3                                                           | 0,339                                                     | 200                                      | 20,4                                                           | 3,680                                                     |
| 60                                       | 12,0                                                           | 0,480                                                     | 250                                      | 23,5                                                           | 5,400                                                     |
| 70                                       | 12,7                                                           | 0,635                                                     | 300                                      | 26,4                                                           | 7,400                                                     |
| 80                                       | 13,3                                                           | 0,800                                                     | 350                                      | 30,9                                                           | 10,200                                                    |
| 90                                       | 14,0                                                           | 0,980                                                     | 400                                      | 35,4                                                           | 13,450                                                    |
| 100                                      | 14,6                                                           | 1,170                                                     | 450                                      | 40,2                                                           | 17,300                                                    |
| 120                                      | 15,7                                                           | 1,570                                                     | 500                                      | 45,7                                                           | 21,900                                                    |

ры рекристаллизации контактирующих материалов и температуры интенсивного их окисления.

Наиболее сложны условия работы контактных соединений в области высоких температур окружающей среды в местах значительных тепловыделений печи. Так, например, в дуговых сталеплавильных печах в наиболее напряженных тепловых условиях находятся контактные соединения медных труб с корпусом или щеками электрододержателя. В руднотермических печах, особенно при работе с открытым колошником, в наиболее тяжелых условиях находятся контактные соединения токоведущих труб со щеками электрододержателей, а также соединения кабельных наконечников гибкого участка токопровода с подвижными башмаками электрододержателей.

Для надежной работы контактных соединений, расположенных в зонах значительного внешнего тепловыделения, как правило, требуется принудительный отвод тепла при помощи водяного охлаждения одной или обеих контактирующих деталей. Не менее важно при этом обеспечить необходимое усилие сжатия токоведущих деталей в рабочих условиях нагретого контактного соединения за счет правильного выбора материала стяжных болтов или шпилек.

Расчет переходного электрического сопротивления контакта может быть сделан лишь весьма приближенно. Величины этих сопротивлений в правильно выполненных контактных соединениях незначительны и не имеют су-

шественного значения с точки зрения падения напряжения и потери мощности. Поэтому в практике конструирования коротких сетей, как правило, нет необходимости рассчитывать переходные сопротивления контактов при условии соблюдения следующих обязательных требований:

1) усилие сжатия при всех режимах работы должно быть не менее 2,5 кН на 1 кА номинального тока (2,5 Н/А);

2) рабочие поверхности контактов должны быть зачищены до металлического блеска и защищены от окисления смазкой или специальными покрытиями (это требование не относится к деталям контактов из неметаллических материалов, например, из угля или графита, а также к деталям из неокисляющихся металлов);

3) за счет естественного или принудительного охлаждения температура соединения не должна превышать максимально допустимую величину.

Необходимо обратить особое внимание на первое требование. В практике эксплуатации коротких сетей большинство неполадок в контактных соединениях вызывается недопустимым уменьшением сжимающих усилий в контактах. Существенную роль в этом может играть различие термического удлинения стяжных болтов или шпилек в сравнении с увеличением суммарной толщины стягиваемого пакета при его нагреве за счет протекания тока. «Пакет» или «Контактный пакет» — совокупность стягиваемых деталей (токоведущие шины, прокладки, накладки, шайбы и другие детали, например, тарельчатые пружины).

Не представляет сложности обеспечить весьма значительное усилие сжатия контактных соединений в холодном состоянии. Однако достичь стабильного поддержания даже минимально необходимого усилия сжатия нагретых контактов короткой сети оказывается сложной задачей.

Для обеспечения стабильности сжимающего усилия в контактном соединении необходимо, чтобы линейное расширение болта или шпильки при нагреве от холодного состояния до рабочей температуры, соответствующей установившемуся режиму протекания тока, не отличалось существенно от увеличения толщины стягиваемого пакета в том же режиме.

В процессе монтажа токоведущие детали стягиваются в холодном состоянии некоторым усилием  $F_0$ , соот-



ветствующим растягивающему напряжению  $\sigma_0$  и относительному удлинению  $\varepsilon_0$  стяжного болта или шпильки.

При разогреве контактного соединения до установившегося теплового состояния в режиме рабочего тока контактный пакет достигает рабочей температуры  $t_1$ , а стяжной болт или шпилька — температуры  $t_2$  (в общем случае  $t_2 \neq t_1$ ). С учетом коэффициентов линейного расширения контактного пакета  $\alpha_1$  и стяжного болта  $\alpha_2$  имеет место различие линейного расширения болта и пакета

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 = \alpha_2(t_2 - t_0) - \alpha_1(t_1 - t_0),$$

вследствие чего болт будет иметь относительное удлинение  $\varepsilon' = \varepsilon_0 - \Delta\varepsilon$  и соответственно изменится напряжение в стяжных болтах и усилие стяжки. Расчеты показывают существенное влияние различного термического расширения стяжных болтов или шпилек и стягиваемого пакета на усилие сжатия, определяющее переходное сопротивление контактного соединения.

Применение маломангнитной стали для изготовления стяжных болтов и шпилек несколько улучшает условия работы контактного соединения. Если вместо болтов из обычной малоуглеродистой стали применить болты из маломангнитной стали, например, типа 1X18H9, то следует ожидать, что в режиме номинальной нагрузки короткой сети их температура будет лишь незначительно превышать температуру контактного пакета.

Применением стяжных болтов или шпилек из сплавов на медной основе, имеющих близкие к меди величины коэффициентов линейного расширения (например, латуни), можно обеспечить относительную стабильность усилия сжатия контактного соединения медных токоведущих деталей.

Крепежные детали из сплавов цветных металлов не подвергаются дополнительному нагреву в магнитном поле и их температура лишь незначительно отличается от температуры контактного пакета. Заменителем сплавов из цветных металлов для изготовления стяжных болтов или шпилек может быть маломангнитная сталь с заметно меньшим коэффициентом линейного расширения в сравнении с медными токоведущими деталями.

Однако маломангнитные стали имеют высокие коэффициенты линейного расширения, ввиду чего применение таких маломангнитных сталей для изготовления стяжных болтов и шпилек контактных соединений является малоэффективным.

Принципиально возможно применение стяжных болтов и шпилек из пластмасс с повышенной механической прочностью. Однако и в этом случае необходимо обращать внимание на соотношение коэффициентов линейного расширения пластмассы и материала токоведущих деталей, поскольку при относительно малых значениях линейного расширения пластмассы может случиться нарушение прочности болта или шпильки. Условия работы контактного соединения особенно усложняются в тех случаях, когда контактный пакет имеет принудительное охлаждение одной или более токоведущих деталей, а стяжной болт или шпилька имеет в рабочем режиме температуру, значительно превышающую температуру контактного пакета. Примером такого соединения является стык водоохлаждаемой токоведущей трубы с водоохлаждаемым корпусом электрододержателя дуговой сталеплавильной печи, обычно являющийся слабым местом короткой сети и причиной частых простоев агрегата. Поскольку принудительное охлаждение стяжного болта или шпильки связано со значительными конструктивными и эксплуатационными сложностями, надежный электрический контакт в таких условиях может быть достигнут только специальными мерами, позволяющими обеспечить необходимое усилие сжатия после нагрева за счет искусственного выравнивания термических расширений стяжного болта или шпильки и контактного пакета с деталями прижима.

В качестве примера приводим расчет усилия сжатия контактного соединения водоохлаждаемой токоведущей трубы диаметром 60/30 мм с бронзовым корпусом электрододержателя (рис. II.1).

Для расчета приняты следующие исходные данные.

1. Рабочая температура корпуса электрододержателя в зоне контактного соединения  $t_1 = 70^\circ\text{C}$  (с учетом омывания корпуса горячими газами).

2. Коэффициент линейного расширения металла корпуса электрододержателя  $\alpha_1 = 17,4 \cdot 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$ .

3. Рабочая температура и коэффициент линейного расширения водоохлаждаемой трубы  $t_2 = 50^\circ\text{C}$  и  $\alpha_2 = 16,8 \cdot 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$ .

4. Рабочая температура и коэффициент линейного расширения прижимной колодки из маломангнитной стали X14Г14Н3Т  $t_3 = 80^\circ\text{C}$  и  $\alpha_3 = 16,3 \cdot 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$ .

5. Рабочая температура и коэффициент линейного расширения стяжного болта из той же маломангнитной стали  $t_{сг} = 90^\circ\text{C}$  и  $\alpha_4 = \alpha_3 = 16,3 \cdot 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$ .

6. Расчетные длины элементов контактного соединения в поперечном сечении токоведущей трубы:  $l_1 = 10$  мм;  $l_2 = 60$  мм;  $l_3 = 25$  мм и  $l_{сг} = 73$  мм.

7. Напряжение в стяжных болтах контактного соединения после затяжки в холодном состоянии (при  $t_0=20^\circ\text{C}$ )  $\sigma_0=75$  МПа.

8. Модуль упругости стали Х14Г14НЗТ  $E=2,07 \cdot 10^5$  МПа.

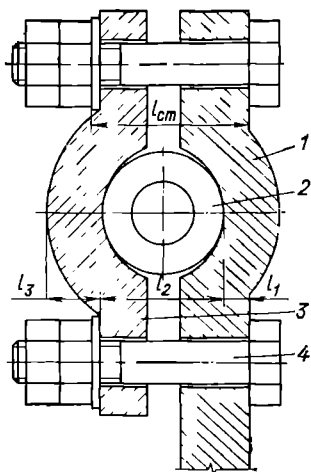


Рис. II.1. К расчету контактного соединения трубины с корпусом электрододержателя дуговой сталеплавильной печи:

1 — бронзовый корпус; 2 — медная водоохлаждаемая труба; 3 — прижимная колодка из маломагнитной стали; 4 — стяжной болт

Расчет. Увеличение размера толщины контактного пакета при нагреве до рабочей температуры

$$\begin{aligned} \Delta l_{\text{п}} &= \Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 = l_1 \alpha_1 (t_1 - t_0) + l_2 \alpha_2 (t_2 - t_0) + \\ &+ l_3 \alpha_3 (t_3 - t_0) = 10 \cdot 17,4 \cdot 10^{-6} (70 - 20) + 60 \cdot 16,8 \cdot 10^{-6} (50 - \\ &- 20) + 25 \cdot 16,3 \cdot 10^{-6} (90 - 20) = (0,910 + 30,2 + 24,4) \cdot 10^{-3} = \\ &= 55,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм.} \end{aligned}$$

Удлинение стяжного болта при нагреве до рабочей температуры

$$\Delta l_{\text{ст}} = l_{\text{ст}} \alpha_4 (t_{\text{ст}} - t_0) = 73 \cdot 16,3 \cdot 10^{-6} (90 - 20) = 83 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

Разность удлинений стяжного болта и контактного пакета при рабочих температурах

$$\Delta l_{\text{ст}} - \Delta l_{\text{п}} = (83 - 55,5) \cdot 10^{-3} = 27,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

Удлинение стяжного болта в результате затяжки в холодном состоянии

$$\Delta l_{\text{ст}0} = l_0 \sigma_0 / E = 73 \cdot 75 / (2,07 \cdot 10^5) = 26,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

Удлинение стяжного болта в результате нагрева превышает упругую деформацию болта в холодном состоянии, то есть в результате нагрева до рабочей температуры контактное соединение полностью теряет усилие сжатия.

В данном случае выполнение стяжного болта из латуни не дает уменьшения термического расширения болта,

поскольку некоторое снижение температуры болта за счет немагнитности латуни компенсируется повышенным коэффициентом линейного расширения латуни в сравнении с маломagnetной сталью. Кроме того, первоначальное удлинение стяжного болта в результате затяжки в холодном состоянии не может заметно измениться, так как снижение приблизительно в 2 раза допускаемого напряжения для латунного болта компенсируется вдвое меньшим значением модуля упругости латуни.

Необходимое усилие сжатия контактного соединения в некоторых случаях можно обеспечить применением стяжных болтов или шпилек из немагнитного жаропрочного сплава типа ХН60Ю, имеющего коэффициент линейного расширения

$$\alpha = 12,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Приняв рабочую температуру стяжного болта из немагнитного сплава  $t_{\text{ст}} = 85^\circ\text{C}$ , определим его удлинение за счет нагрева

$$\Delta l_{\text{ст}} = 73 \cdot 12,3 \cdot 10^{-6} (85 - 20) = 58,2 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

Разность линейных расширений болта и пакета

$$\Delta l_{\text{ст}} - \Delta l_{\text{п}} = (58,2 - 55,5) 10^{-3} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

Удлинение стяжного болта в результате затяжки в холодном состоянии примем, как и для стали Х14Г1НЗТ, т. е.  $26,5 \cdot 10^{-3}$  мм (при повышенном на 10 % модуле упругости сплав ХН60Ю допускает на столько же более высокое напряжение на растяжение). Поскольку дополнительное удлинение стяжного болта в сравнении с контактным пакетом составляет лишь 10 % удлинения от предварительной затяжки, усилие стяжки пакета в горячем состоянии снизится лишь на 10 %, т. е. рабочее усилие стяжки будет вполне достаточным для обеспечения работоспособности контактного соединения.

При отсутствии возможности выполнения стяжных болтов или шпилек из дорогого и дефицитного сплава типа ХН60Ю выравнивание линейных расширений болта и контактного пакета может быть достигнуто введением дополнительной промежуточной колодки (между токоведущей медной трубой и нажимной крышкой) из металла с высоким коэффициентом линейного расширения, например, из маломagnetной стали Х14Г1НЗТ или из алюминия.

Для выбора действенного способа выравнивания термических расширений контактного пакета и стяжного болта необходимо экспериментально определить фактические температуры нагрева отдельных деталей контакт-

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОВОДНИКОВЫХ И КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ В КОРОТКИХ СЕТЯХ

| Наименование                   | Плотность<br>при 20 °С,<br>г/см <sup>3</sup> | Коэффициент<br>линейного<br>расширения<br>при 20-100 °С,<br>10 <sup>-6</sup> °С <sup>-1</sup> | Удельное электрическое<br>сопротивление |                                                      | Удельная тепло-<br>проводность при<br>20 °С, Вт/(м·К) | Механические свойства при 20 °С           |                             |                                                               |
|--------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------|
|                                |                                              |                                                                                               | при 20 °С,<br>мкОм·м                    | температур-<br>ный коэффи-<br>циент при<br>20-300 °С |                                                       | предел проч-<br>ности на раз-<br>рыв, МПа | предел<br>текучести,<br>МПа | нормаль-<br>ный<br>модуль<br>упругости<br>10 <sup>9</sup> МПа |
| Сталь 10                       | 7,86                                         | 11,6                                                                                          | 0,15                                    | 0,006                                                | 69                                                    | 340                                       | 210                         | 2,02                                                          |
| Ст3                            | 7,85                                         | 12,2                                                                                          | 0,17                                    | 0,0065                                               | 65                                                    | 380                                       | 220                         | 2,1                                                           |
| Сталь X13(ЭЖ-1)                | 7,7                                          | 10,1                                                                                          | 0,5                                     | 0,001                                                | 27,6                                                  | 650                                       | 390                         | 2,2                                                           |
| Сталь маломагнитная X14Г14Н3Т  | 7,82                                         | 16,3                                                                                          | 0,6                                     | 0,0015                                               | 19,2                                                  | 700                                       | 270                         | 2,07                                                          |
| Сталь маломагнитная X18Н9Т     | 7,9                                          | 16,6                                                                                          | 0,72                                    | 0,0022                                               | 16,3                                                  | 650                                       | 310                         | 2,02                                                          |
| Немагнитный сплав ХН60Ю        | 7,9                                          | 12,3                                                                                          | 1,2                                     | 0,00024                                              | 10,4                                                  | 720                                       | 350                         | 2,29                                                          |
| Латунь Л62                     | 8,5                                          | 17,4                                                                                          | 0,071                                   | 0,001                                                | 83,5                                                  | 360                                       | 110                         | 1,0                                                           |
| Латунь ЛС59-1 прессованная     | 8,5                                          | 19                                                                                            | 0,065                                   | 0,0026                                               | 106                                                   | 370                                       | 145                         | 0,93                                                          |
| Бронза Бр0ЦС-4-4-2,5           | 8,9                                          | 18,2                                                                                          | 0,11                                    | 0,002                                                | 83,5                                                  | 310                                       | 130                         | 0,75                                                          |
| Бронза БрАЖ-9-4                | 7,5                                          | 16,2                                                                                          | 0,12                                    | 0,002                                                | 58,5                                                  | 550                                       | 135                         | 1,16                                                          |
| Медь техническая проводниковая | 8,93                                         | 16,8                                                                                          | 0,018                                   | 0,0043                                               | 385                                                   | Твердая 360<br>Мягкая 200                 | 200<br>140                  | 1,1                                                           |
| Алюминий марок А5, А6, АЕ      | 2,7                                          | 24                                                                                            | 0,029                                   | 0,0041                                               | 205                                                   | Твердый 140<br>Мягкий 90                  | 100<br>30                   | 0,72                                                          |
| Силумин марки АД31Т1           | 2,7                                          | —                                                                                             | 0,0325                                  | 0,004                                                | —                                                     | —                                         | —                           | —                                                             |
| Электроды графитированные      | 1,5—1,7                                      | —                                                                                             | 6—13                                    | —                                                    | —                                                     | —                                         | —                           | —                                                             |
| Электроды угольные             | 1,45—1,6                                     | —                                                                                             | 35—60                                   | —                                                    | —                                                     | —                                         | —                           | —                                                             |
| Электроды самообжигающиеся     | 1,35—1,45                                    | —                                                                                             | 60—90                                   | —                                                    | —                                                     | —                                         | —                           | —                                                             |

ТАБЛИЦА 2.3

ДОПУСКАЕМЫЕ ПО УСЛОВИЯМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ  
НАГРУЗКИ  $Q_{\text{доп}}$  ДЛЯ БОЛТОВ И ШПИЛЕК

| Диаметр и шаг<br>резьбы болта<br>или шпильки | Допускаемая нагрузка для болтов и шпилек из латуни<br>и некоторых марок сталей, кН |                                              |      |          |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------|----------|
|                                              | латунь                                                                             | сталь коррозион-<br>нотойкая типа<br>1Х18Н9Т | Ст 3 | сталь 20 |
| M10×1,5                                      | 2,5                                                                                | 6                                            | 5    | 5,5      |
| M12×1,75                                     | 3,75                                                                               | 9                                            | 7,5  | 8,2      |
| M16×2                                        | 7,0                                                                                | 17                                           | 14   | 15,5     |
| M20×2,5                                      | 11                                                                                 | 27                                           | 22   | 24       |
| M24×3                                        | 16                                                                                 | 39                                           | 32   | 35       |
| M30×3,5                                      | 26                                                                                 | 64                                           | 52   | 57       |
| M36×4                                        | 38                                                                                 | 95                                           | 76   | 84       |
| M42×4,5                                      | 53                                                                                 | 127                                          | 106  | 117      |
| M48×5                                        | 70                                                                                 | 172                                          | 140  | 155      |

ного узла в конкретных условиях его рабочего режима. В качестве справочного материала для ориентировки в табл. 2.2 приведены основные физические и механические свойства некоторых металлов, применяемых в конструкциях контактных соединений, а в табл. 2.3 допускаемые по условиям механической прочности нагрузки для болтов и шпилек из латуни и некоторых марок стали.

• Качество электрического контакта зависит не только от фактической величины суммарного усилия затяжки болтов, но и от степени жесткости концов шин, образующих контакт — чем жестче концы шин, тем хуже контакт, поскольку значительная часть усилия затяжки гасится во внутреннем механическом напряжении шин. С этой точки зрения для улучшения контакта широких шин значительной жесткости полезно выполнять продольные прорезы на концах шин [7]. В этом же источнике приводится ряд других полезных рекомендаций по выполнению и обслуживанию контактных соединений. В частности, указывается, что достаточная длина нахлеста в контактах плоских шин составляет 5—7 толщин одной шины.

## 2. Токоведущие детали электрододержателя

Электрододержатель представляет собой совокупность узлов и деталей, предназначенных для удержания и перепуска электрода, а также для подвода к нему тока.

Конструкции электрододержателей существенно различаются в зависимости от вида электрода и типа печи. Основными видами электродов дуговых печей являются: а) графитированный или угольный электрод, наращиваемый готовыми секциями посредством резьбового соединения; б) самообжигающийся электрод со сварным кожухом из тонколистовой стали, заполняемым электродной массой.

Графитированные и угольные электроды имеют преимущественное распространение в дуговых печах, а также в некоторых типах руднотермических печей. Например, в рафинировочных печах для получения ферросплавов методом полного проплавления шихты дуговым процессом и в печах для получения титановых шлаков. Самообжигающиеся электроды широко применяются в подавляющем большинстве руднотермических печей непрерывного действия.

Корпус и токоведущие детали электрододержателя дуговой сталеплавильной печи находятся в зоне высоких температур над сводом печи, а в отдельных случаях аналогичные элементы электрододержателя находятся в зоне открытого пламени, например, в рафинировочных печах с открытым колошником. В сочетании с тем или иным механизмом корпус электрододержателя обеспечивает передачу тока к электроду и зажим электрода с необходимым усилием.

К самообжигающемуся электроду руднотермической печи подвод тока осуществляется контактными щеками, прижимаемыми к электроду внутри нажимного кольца специальными устройствами, а удержание и перепуск электрода осуществляется отдельными механизмами. Тепловая нагрузка на токоведущие детали таких электрододержателей аналогична условиям эксплуатации их в дуговых сталеплавильных печах. Особенно это относится к открытым руднотермическим печам, где электрододержатели постоянно находятся в зоне пламени сгорающих над колошником газов. Несколько легче условия работы электрододержателей в руднотермических печах с закрытым колошником. Однако и в этом случае необходимо считаться с повышенными тепловыми нагрузками за счет возможного погружения контактных щек ниже уровня свода, а также за счет воздействия высокотемпературных газовых свищей из реакционной зоны печи.

С учетом приведенных соображений токоведущие детали электрододержателей дуговых печей, как правило,

выполняются водоохлаждаемыми. Исключения имеют место в редких случаях для дуговых сталеплавильных печей малой вместимости (в основном лабораторного и полупромышленного назначения), а также для отдельных маломощных руднотермических печей со спокойным режимом работы (в частности, для печей, работающих блок-процессом).

На рис. 11.2 показана конструкция корпуса электрододержателя, ранее применявшаяся в печах серии ДСВ (в дальнейшем и в печах серии ДСП). Зажим электрода, охватываемого замкнутым водоохлаждаемым литым бронзовым корпусом осуществляется через окно в корпусе стальной колодкой от рычажно-пружинного механизма с пневматическим или гидравлическим цилиндром, обеспечивающим отжим колодки от электрода. Такая конструкция характеризуется значительной массой сложной бронзовой отливки. Так, например, для электрода диаметром 500 мм масса обработанного корпуса составляет около 900 кг, что соответствует массе отливки около 1000 кг.

На рис. 11.3 представлена более рациональная облегченная конструкция корпуса электрододержателя, разработанная ВНИИЭТО для электрода диаметром 555 мм. В этой конструкции электрод притягивается хомутом из жаропрочной стали к открытому бронзовому водоохлаждаемому корпусу, масса которого в обработанном состоянии составляет около 700 кг. Помимо существенного упрощения и облегчения бронзовой отливки корпуса электрододержателя, в этой конструкции передача тока к электроду осуществляется кратчайшим путем, за счет чего достигается уменьшение активного и реактивного сопротивления корпуса. Такая конструкция была опробована и испытана на многих печах ДСП-100 и показала хорошие эксплуатационные качества. В случае необходимости взамен бронзового литого корпуса электрододержателя может применяться сварной корпус из толстолистовой малоуглеродистой стали. В этом случае несколько ухудшаются электрические показатели печи из-за дополнительных потерь в магнитной массе стального корпуса.

Попытки изготовления сварных и сварнолитых водоохлаждаемых корпусов электрододержателей из маломагнитной стали (например, X18H9T) пока не дали удовлетворительных результатов, так как в процессе эксплуатации в условиях высоких и неравномерных тепловых нагрузок весьма затруднительно обеспечить гер-



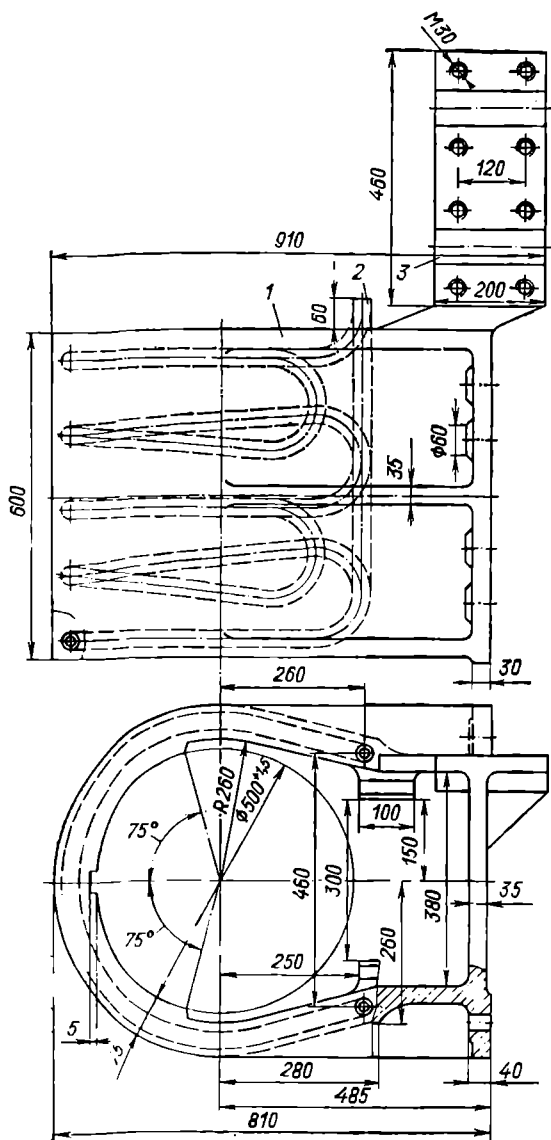


Рис. 11.2. Корпус электроддержателя электроды ДСВ-40:

1 — отливка из бронзы типа БРХ-1; 2 — змеевик водяного охлаждения (медная труба диаметром 36/26); 3 — паз для присоединения медной трубы

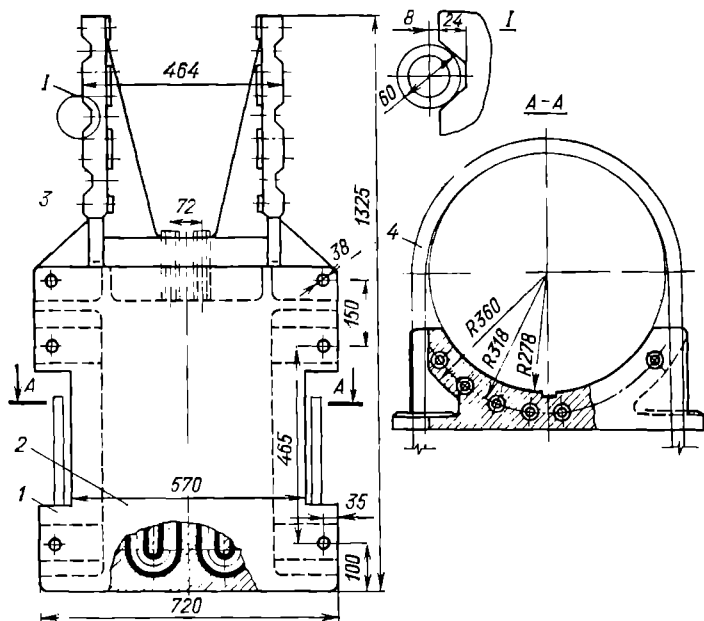


Рис. 11.3. Корпус электрододержателя электропечи ДСП-100:

1 — бронзовая отливка; 2 — змеевик водяного охлаждения; 3 — паз для присоединения медной трубы диаметром 60 мм; 4 — хомут для прижима электрода к корпусу электрододержателя (немагнитная сталь типа Х18Н9)

метичность сварных швов при использовании стали такого типа.

В некоторых литературных источниках приводятся заниженные величины предельно допустимых плотностей тока в контактных соединениях электродов со смежными поверхностями корпусов электрододержателей. В работе [8] максимальная плотность тока контакта графитированного электрода с медным корпусом электрододержателя определяется величиной  $2,6 \text{ А/см}^2$ , что противоречит практике эксплуатации современных мощных дуговых печей. Реальные плотности тока в контактных соединениях многократно превосходят вышеуказанные ограничения без ущерба для надежности работы печей.

Из теории и практики известно, что электрическое сопротивление контакта не зависит от площади соприкосновения контактирующих деталей, а при заданных материалах, форме и состоянии контактных поверхностей

определяется усилием их сжатия. Поэтому для надежной работы электрододержателя в реальных условиях требуется обеспечить необходимое усилие зажима электрода и устойчивый отвод тепла из зоны контактного соединения.

Применительно к графитированным электродам основные размеры корпуса электрододержателя выбираются

по следующим конструктивным соображениям: а) диаметр внутренней поверхности должен соответствовать диаметру электрода; б) высота соприкасающейся с электродом поверхности обычно принимается около 1,2 диаметра электрода.

При определении необходимого усилия зажима электрода следует в первую очередь исходить из условия надежного удержания электрода в корпусе электрододержателя от проскальзывания в процессе работы печи.

Расчет необходимого для удержания электрода усилия зажима производится следующим образом. На электрод, зажатый в электрододержателе, действуют следующие силы (рис. 11.4):

а) сила тяжести электрода  $G_{эл}$ , обусловленная его массой  $M_{эл}$ ;

б) две равные противоположно направленные силы  $P$ , создаваемые механизмом зажима электрода;

в) две силы трения  $F_{тр}$  (в общем случае эти две силы могут быть различными, но для практических расчетов они обычно принимаются одинаковыми с усреднением расчетных коэффициентов трения).

По условию равновесия необходимо, чтобы

$$G_{эл} = -2F_{тр} = 2P' f,$$

где  $f$  — усредненный коэффициент трения электрода на поверхностях соприкосновения с электрододержателем.

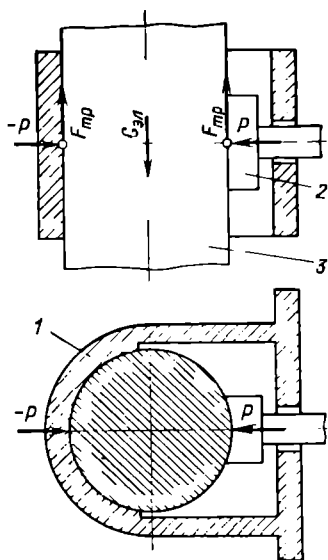


Рис. 11.4. К расчету необходимого усилия зажима электрода:

1 — корпус электрододержателя; 2 — нажимная колодка; 3 — электрод

Величина усилия зажима электрода должна быть не менее

$$P' = G_{эл.} (2f).$$

Действительное усилие зажима электрода  $P$  должно приниматься с коэффициентом запаса  $k=1,5\div 2,0$ . Это необходимо по следующим соображениям:

а) во избежание проскальзывания электродов под действием дополнительных динамических нагрузок от вибрации рукавов электрододержателей и от усилий взаимодействия между электродами при протекании по ним тока;

б) с целью снижения переходного сопротивления контакта между электродом и электрододержателем.

Кроме того, в процессе эксплуатации рычажно-пружинного механизма зажима электрода имеет место уменьшение прижимающего усилия против первоначального за счет термического расширения рычагов и тяг механизма, а также за счет старения пружин.

Пример. Определить необходимое усилие зажима графитированного электрода при следующих исходных данных: масса электрода  $M_{эл.}=3500$  кг; усредненный коэффициент трения  $f=0,1$ .

Решение:

$$G_{эл} = M_{эл} \cdot 9,81 = 3500 \cdot 9,81 = 34300 \text{ Н};$$

$$P' = 34300 / (2 \cdot 0,1) = 171\,500 \text{ Н} = 171,5 \text{ кН}.$$

Механизм зажима должен обеспечивать в рабочем режиме усилие

$$P = kP' = 1,75 \cdot 171,5 = 300 \text{ кН}.$$

Усилие зажима, выбранное, исходя из условий надежного удержания электрода от проскальзывания, является достаточным для обеспечения хорошего электрического контакта.

В целях уменьшения электрических потерь в контакте электрододержатель — электрод можно рекомендовать увеличение удельного давления в контакте за счет перехода от контакта на значительной поверхности соприкосновения к линейному контакту. Применительно к рассмотренному выше примеру это означает создание электрического контакта с электродом по двум выступам шириной порядка 10 мм на внутренней поверхности корпуса электрододержателя.

При высоте корпуса электрододержателя 700 мм поверхность двух линейных контактов будет составлять

$$S_k = 2 \cdot 1 \cdot 70 = 140 \text{ см}^2,$$

а удельное давление на поверхность графитированного электрода

$$F_0 = \frac{P}{S_k} = \frac{3 \cdot 10^5 \text{ Н}}{140 \text{ см}^2} = 21,4 \text{ МПа.}$$

При таком удельном давлении, близком к пределу прочности графитированного электрода, можно ожидать существенного снижения переходного сопротивления контакта и соответствующего уменьшения электрических потерь.

Наиболее уязвимым местом в электрододержателях дуговых сталеплавильных печей обычно является контактное соединение токоподводящих шин с корпусом электрододержателя. В подавляющем большинстве случаев токоподвод на рукавах электрододержателей осуществляется водоохлаждаемыми медными трубами, а медные плоские шины с естественным охлаждением встречаются лишь на сравнительно маломощных дуговых печах устаревших конструкций.

Рукав электрододержателя дуговой сталеплавильной печи обычно находится под напряжением, подведенным к корпусу электрододержателя, что обусловлено трудностью обеспечения надежной электрической изоляции между корпусом электрододержателя и рукавом в условиях высокой температуры и открытого пламени над сводом печи.

Как показывает опыт эксплуатации дуговых сталеплавильных печей, достаточно обеспечить надежную изоляцию между рукавом электрододержателя и металлоконструкцией опорной колонны или каретки электрододержателя (главную изоляцию печи).

В руднотермических электропечах применяются, как правило, самообжигающиеся электроды с кожухом из листовой стали. Подвод тока к таким электродам производится контактными щеками, выполняемыми из меди или из сплавов на ее основе. До недавнего времени наибольшее распространение имели литые контактные щеки из меди и ее сплавов с залитыми змеевиками водяного охлаждения. Срок службы таких щек обычно составлял от 6 до 12 мес. и лишь изредка при особо высоком качестве изготовления и легких условиях эксплуатации — от 1,5 до 2 лет. Это объясняется в основном двумя характерными недостатками щек такого типа: а) трудностью обеспечения благоприятных и стабильных условий теплоотдачи от корпуса щеки к охлаждающей воде

через змеевик; б) наличием контактного соединения токоподводящей трубы с корпусом щеки, работающим при высоких температурах.

Значительное увеличение срока службы контактной щеки достигнуто на ЧЭМК (печь РКО-16,5) за счет выполнения змеевика из медной трубы диаметром 60/30 мм. При этом один конец трубы змеевика используется для подвода тока посредством приварки к медной трубе подвижного участка жесткого токопровода, а другой конец — для перехода охлаждающей воды к змеевику соседней контактной щеки.

На рис. II.5 показана хорошо зарекомендовавшая себя в эксплуатации контактная щека руднотермической печи РПЗ—48. Характерной особенностью этой щеки является отсутствие змеевика, взамен которого в теле щеки высверливаются каналы для водяного охлаждения. Щека выполняется из медной доски толщиной около 110 мм и имеет плоскую форму соответственно форме поперечного сечения самообжигающегося электрода (прямоугольное сечение со скругленными боковыми поверхностями и подводами тока только по двум плоским продольным поверхностям электрода).

Номинальный ток 14 кА подводится к щеке двумя медными трубами диаметром 60/40 мм, которые одновременно служат для подвода и отвода воды. Присоединение токоведущей трубы к щеке производится при помощи приваренного к трубе массивного медного фланца с легко сминаемой медной прокладкой, обеспечивающей надежное уплотнение на входе и выходе охлаждающей воды. Эта же медная прокладка передает значительную часть тока в контактном соединении от токоведущей трубы к телу контактной щеки.

С целью устранения контактного присоединения предложена конструкция контактной щеки, показанная на рис. II.6. Аналогично предыдущей конструкции щека выполняется из медной доски со сверлением каналов водяного охлаждения, после чего, в случае необходимости, ей прессованием придается форма, соответствующая поверхности электрода. В гнездо канала водяного охлаждения вваривается короткая медная труба, к концу которой в процессе монтажа приваривается труба подвижного участка жесткого токопровода. Такая конструкция является простой в изготовлении и надежной в эксплуатации. При среднем сроке службы щеки 2—3 года отсутствие разъемного контактного соединения является

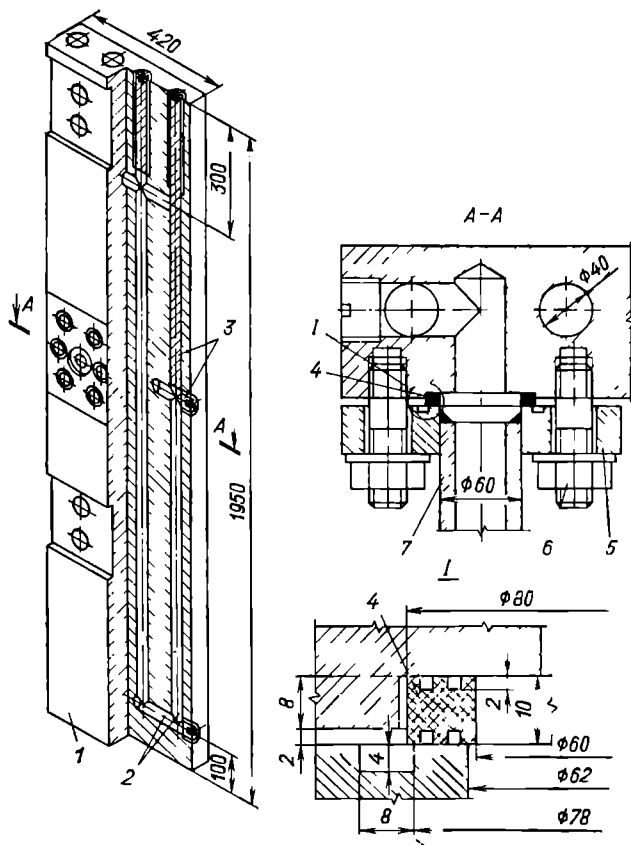


Рис. II.5. Контактная щека электропечи РПЗ-48 с фланцевым присоединением токоведущих труб:

1 — корпус (медная плита); 2 — каналы водяного охлаждения; 3 — заглушка (пробка); 4 — снимаемая уплотняющая прокладка (мягкая медь); 5 — медный фланец; 6 — шпилька из немагнитной стали; 7 — медная труба





преимуществом конструкции. При замене щеки (обычно при капитальном ремонте печи) отрезают медные трубы щеки в местах их приварки к трубам токоподвода с последующей заваркой стыков после установки новой щеки.

В качестве заготовки для такой щеки обычно используется медный прокат в виде плиты толщиной 80—90 мм без обработки рабочей поверхности щеки. Каналы для водяного охлаждения выполняются на горизонтальном станке глубокого сверления, а цилиндрическая форма придается ей на прессе с усилием порядка 10 МН (применительно к электродам прямоугольного сечения щека выполняется плоской).

В отличие от корпуса электрододержателя дуговой сталеплавильной печи контактные щеки руднотермической печи, помимо подвода тока, играют существенную роль в процессе коксования самообжигающегося электрода. С учетом этого высота контактной щеки выбирается, исходя из условий теплового режима работы электрода, и для большинства руднотермических печей обычно составляет 0,8—1,2 диаметра электрода (по условиям подвода тока она могла бы быть по крайней мере вдвое меньше).

Ширина контактной щеки принимается в зависимости от количества щек с таким расчетом, чтобы зазоры между смежными щеками на поверхности кожуха электрода были по возможности небольшими (обычно они составляют 20—40 мм).

В отдельных случаях с целью более равномерного охлаждения кожуха самообжигающегося электрода контактные щеки выполняются с чередующимися выступами и впадинами на боковых поверхностях.

### 3. Жесткие участки токопровода

Жесткие участки токопровода дуговой печи обычно выполняются медными шинами прямоугольного сечения или медными трубами круглого сечения.

Шины прямоугольного сечения с естественным охлаждением имеют широкое распространение на участках токопровода вне зоны значительного тепловыделения от печи. По действующим Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) температура шин и контактных соединений с учетом нагрева как электрическим током, так и от внешних тепловых излучений, как правило, не дол-

жна превышать 90 °С. В реконструируемых установках для вторичных токоподводов допускается для медных шин температура 140 °С и для алюминиевых 120 °С.

С целью снижения индуктивного сопротивления жесткие участки коротких сетей дуговых печей по возможности выполняются с бифилярным расположением шин прямой и обратной полярности. В бифилярном пакете общее число шин соответствует числу выводов вторичной стороны печного трансформатора и не превышает 16.

Для шинных пакетов обычно применяются медные шины. Размеры поперечного сечения медных шин обычно не превышает 400×12 мм.

В жестких участках токопровода находят применение алюминиевые шины (взамен медных) соответственно увеличенных размеров поперечного сечения. Для присоединения алюминиевых шин к медным элементам токопроводов применяются медно-алюминиевые переходные пластины. Алюминиевая часть пластины приваривается к алюминиевой шине, а медная — присоединяется болтами к медной детали токопровода. Большая работа по широкому и эффективному внедрению алюминиевых шин проведена энергетиками Кузнецкого завода ферросплавов под руководством А. Н. Сидорова.

В условиях, когда шины с естественным охлаждением неприменимы либо по условиям высокой температуры окружающей среды (например, участки подвижной части токопровода на рукавах электрододержателей дуговой сталеплавильной печи), либо при необходимости пропуска рабочего тока, превышающего допустимый предел нагрузки обычного шинного пакета, используются медные трубы с водяным охлаждением.

При оценке целесообразности применения трубчатого токопровода необходимо руководствоваться следующими соображениями. Токоведущие трубы в сравнении с прямоугольными шинами такой же площади поперечного сечения обладают повышенным индуктивным сопротивлением. В частности, индуктивность медной трубы Ø 100/70 мм ориентировочно на 20 % больше индуктивности эквивалентной по сечению медной шины 400××10 мм. Активное сопротивление труб заметно ниже в сравнении с прямоугольными шинами той же площади поперечного сечения за счет пониженного удельного электрического сопротивления водоохлаждаемой трубы, имеющей более низкую температуру. Выбор оптималь-

ной плотности тока в водоохлаждаемом трубчатом токопроводе должен производиться на основании технико-экономических расчетов различных вариантов по минимуму приведенных затрат с учетом стоимости электрических потерь, капитальных затрат на сооружение токопровода и амортизационных отчислений.

Основываясь на приведенных выше соображениях, области рационального применения шинных и трубчатых участков токопроводов можно разграничить следующим образом. Шинные пакеты с естественным охлаждением предпочтительны при условии отсутствия существенного тепловыделения на токопровод со стороны печи и достаточной пропускной способности пакета, соответствующей максимальному рабочему току.

Характерной областью целесообразного применения шинных пакетов являются участки коротких сетей от выводов печного трансформатора до неподвижных башмаков большинства дуговых сталеплавильных печей малой и средней вместимости и руднотермических печей мощностью до 30 МВ·А.

Трубчатые водоохлаждаемые пакеты являются практически единственным возможным решением в условиях повышенного тепловыделения от печи, а также при рабочих токах, превышающих допустимую нагрузку шинного пакета с естественным охлаждением. Участки токопровода на подвижных рукавах и траверсах печей, а также стационарные участки токопровода в зонах интенсивного тепловыделения, выполняются, как правило, из водоохлаждаемых труб.

В бифилярных пакетах расстояние между шинами прямой и обратной полярности должно приниматься минимально возможным и достаточным для обеспечения надежности работы короткой сети. В токопроводах дуговых печей преимущественное распространение имеют плоские медные шины толщиной 10—12 мм.

По требованиям ПУЭ минимальные расстояния между токоведущими деталями разной полярности, а также между токоведущими деталями и заземленными конструкциями должны составлять для запыленных помещений с шинами высотой менее 250 мм — 20 мм, а при больших высотах эта величина увеличивается на  $5 \div 10$  мм. Для чистых помещений (трансформаторная камера) эта величина может быть уменьшена на 5 мм.

В некомпенсированных пакетах с шинами одной полярности увеличение расстояния между смежными ши-

нами целесообразно как с точки зрения снижения индуктивного и активного сопротивлений, так и с целью улучшения условий охлаждения шинного пакета. В этих условиях расстояние между шинами ограничивается допустимым размером ширины пакета и другими конструктивными соображениями.

На рис. II.7 показан шинный мост (ошиновка вторичной стороны трансформатора до неподвижных башмаков на выходе из стены печной подстанции дуговой сталеплавильной печи ДСП-25), выполненный медными шинами сечением  $300 \times 12$  мм.

При двухбифилярной схеме короткой сети («несимметричный треугольник на электродах») на рукава электрододержателей фазные токи должны подаваться через шесть кабельных гирлянд. В соответствии с этим из окна печной подстанции должны выйти шесть так называемых полуфазных пакетов шин. Конструкция ошиновки не представляет сложности, за исключением того, что данная схема требует, чтобы рядом с полуфазой «а» из окна выходила полуфаза «х», для чего в ошиновке предусматривается специальная перемычка 4.

Каждая пара соответствующих полуфаз сводится в общий пакет из четырех шин (по 2 шины на полуфазу), а перед оконным проемом печной подстанции полуфазы раздвигаются на расстояние, определяемое по условиям компоновки кабельных гирлянд.

В общем пакете из четырех шин расстояние между смежными шинами разной полярности принимаются 20 мм, а между шинами одной полярности — около 40 мм. Последнее ограничивается допустимым габаритом ширины пакета, проходящего через окно трансформатора тока. В ряде случаев измерение тока осуществляется на первичной стороне печного трансформатора, за счет чего конструкция шинного моста несколько упрощается.

На рис. II.8 показан шинный мост электропечи ДСП-100И6 со схемой короткой сети, треугольник на «неподвижных башмаках», выполненный из водоохлаждаемых медных труб диаметром 200/170 мм.

Конструкция шинного моста предельно упрощается, если соединение в треугольник осуществляется внутри печного трансформатора. В таких случаях от каждой фазы трансформатора линейный ток выводится через одну или несколько параллельных шин и через них доводится до неподвижных башмаков короткой сети.

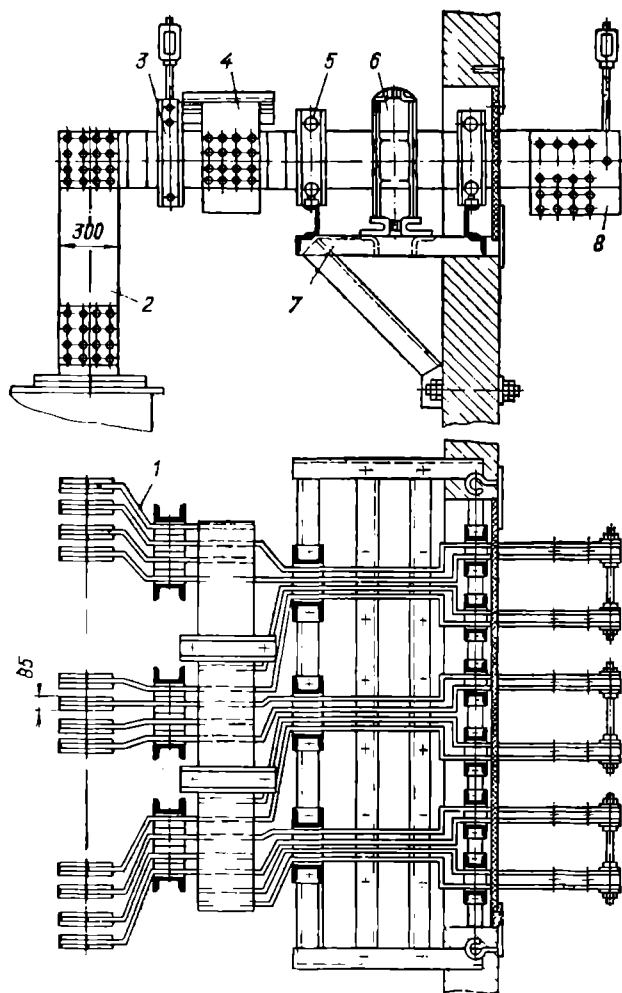
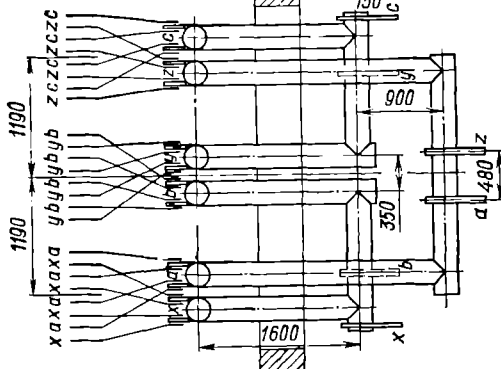


Рис. 11.7. Шинный мост электропечи ДСП-25.

1 — медная шина сечением  $300 \times 12$ ; 2 — компенсатор; 3 — сжим пакета с подвеской; 4 — шинная перемычка; 5 — сжим пакета с опорой; 6 — трансформатор тока; 7 — опорная металлоконструкция из маломagnetной стали; 8 — башмак для присоединения гибких кабелей (медь)



1 — компенсатор; 2 — медная труба 200/170 мм; 3 — проем в стене печной подстанции; 4 — неподвижный башмак из медной доски

Переход от шинных пакетов к гибкому участку токопровода осуществляется посредством неподвижных башмаков 8, выполняемых либо из медных шин с естественным охлаждением, либо из медных досок, обычно имеющих водяное охлаждение в виде просверленных в них каналов. Необходимость водяного охлаждения башмаков определяется конкретными условиями работы печной установки, в частности величиной рабочего тока, воз-

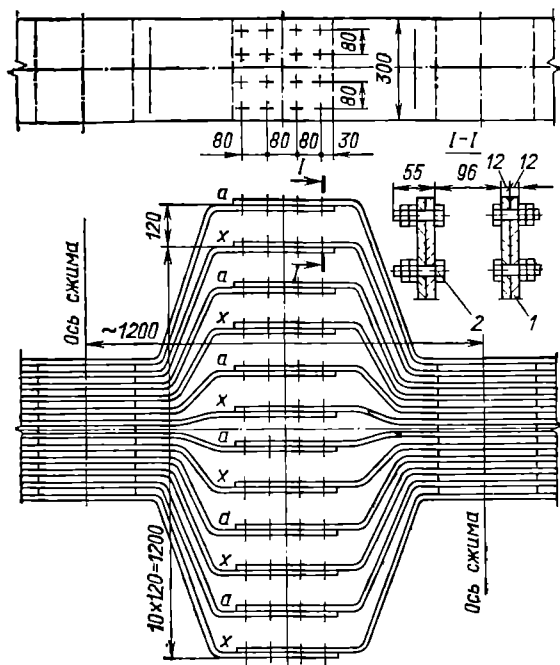


Рис. II.9. Разъем бифилярного пакета шин с индивидуальными сжимами:  
1 — медная шина сечением  $300 \times 12$ ; 2 — болт  $M16 \times 55$  (материал — латунь или  
маломагнитная сталь)

возможностью перегрузки трансформатора, а также режимом работы печи.

Нагрузка от массы башмаков и кабельных гирлянд воспринимается подвесками на концах шинных пакетов, а боковые усилия на шинные пакеты при наклонах печи — опорными металлоконструкциями 7, к которым крепятся сжимы шинных пакетов 5.

В шинных пакетах большой протяженности и сложной конфигурации иногда возникает необходимость иметь разъемное соединение. Это может вызываться условиями изготовления, монтажа и транспортировки пакетов, а также соображением облегчения аварийного ремонта и замены отдельных участков токопровода.

Для многошинного бифилярного пакета раздельное болтовое соединение каждой шины в месте разъема вызывает существенное увеличение ширины пакета с значительным его усложнением (рис. II.9). Более простым

и компактным является разъемный стык бифилярного пакета с общей стяжкой всех шин пакета (рис. II.10, а).

При выборе материала и диаметра стяжных шпилек необходимо учитывать указания, приведенные в п. 1 данной главы.

На рис. II.10, б показано разъемное соединение шинного пакета с проводниками одной полярности. Заполнение промежутков между шинами в такой конструкции стыка может осуществляться либо отрезками шин, либо электроизоляционными прокладками достаточной тепловой и механической стойкости. Однако при этом следует учитывать, что изоляционные прокладки обычно имеют значительно меньшие коэффициенты линейного расширения в сравнении с медью (ориентировочно в 3 раза), вследствие чего при некоторых условиях может произойти недопустимое ослабление сжима пакета при его работе.

При необходимости могут применяться изоляционные прокладки в сочетании с прокладками из алюминия, обладающего высоким коэффициентом линейного расширения.

Компоновка проводников в пакетах из труб производится по тому же принципу, как и в шинных пакетах. В трубчатых пакетах с токами одного направления расстояние между смежными трубами следует принимать максимально возможным по конструктивным условиям (например, токоведущие трубы на траверсах электрододержателей руднотермических печей и на рукавах электрододержателей сталеплавильных дуговых печей).

Для бифилярных трубчатых пакетов применяется два вида расположения труб разной полярности — коридорное и шахматное.

Шахматное расположение труб дает в сравнении с коридорным заметное снижение индуктивного сопротивления пакета при значительно меньшем различии величин сопротивлений отдельных труб пакета. Если при четырехрядном коридорном расположении труб отношение максимального индуктивного сопротивления отдельной трубы среднего ряда к минимальному индуктивному сопротивлению трубы крайнего ряда может составлять 4—6, то при шахматном расположении это отношение уменьшается до 1,4—1,8.

Однако несмотря на преимущества шахматного расположения с электротехнической точки зрения, в практике чаще применяется коридорное расположение труб.



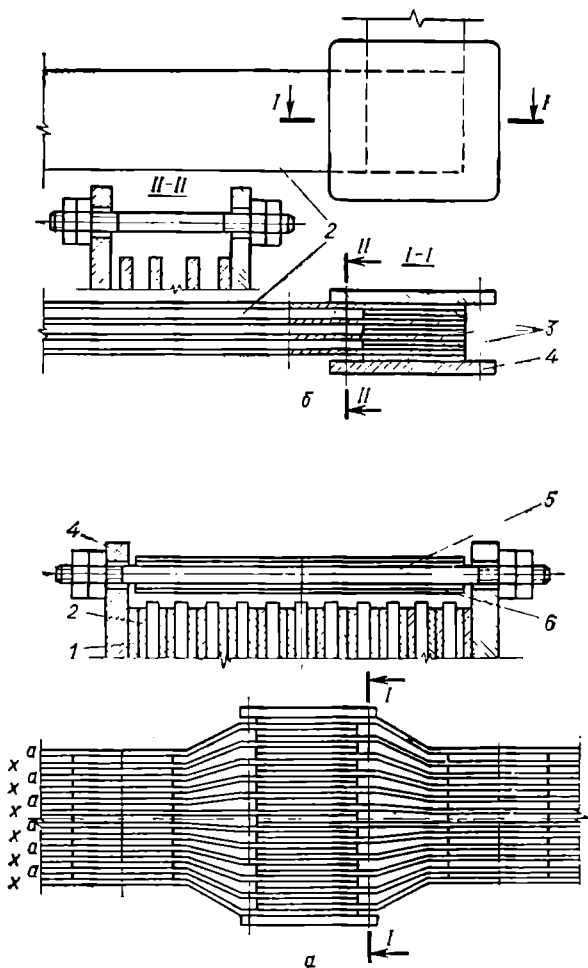


Рис. 11.10. Разъем шинного пакета с общим сжимом:

*a* — бифилярный пакет; *б* — пакет с током одного направления; *1* — шина медная; *2* — прокладка электроизоляционная; *3* — прокладка из медной шины; *4* — плита (маломагнитная сталь); *5* — шпилька (латунь или маломагнитная сталь); *б* — трубка электроизоляционная

Обусловлено это с одной стороны повышенной сложностью изготовления, монтажа и ремонта шахматного пакета, особенно на концевых участках перехода к выводам трансформатора и к башмакам короткой сети, а с другой стороны тем, что доля индуктивности бифилярного пакета в суммарной индуктивности печного контура весьма незначительна.

Наибольшее распространение имеют бифилярные пакеты с двухрядным и четырехрядным расположением труб, причем, четырехрядный пакет в коридорном исполнении может иметь либо чередующиеся ряды труб разной полярности, либо два средних ряда одной полярности. Обе эти разновидности коридорного пакета в первом приближении равноценны по величинам индуктивного и активного сопротивлений, поэтому выбор того или другого определяется соображениями простоты и удобства присоединения труб пакета к смежным элементам токопровода.

Расстояние в свету между токоведущими трубами разных полярности рекомендуется принимать равным 0,35—0,4 наружного диаметра трубы, но не менее 25 мм.

На рис. 1.11 представлен трубчатый токопровод одной фазы прямоугольной шестиэлектродной печи РПЗ-48 для выплавки марганцевых сплавов, питаемой от трех однофазных трансформаторов мощностью по 21 МВ·А. В соответствии с количеством и расположением боковых трубчатых выводов печного трансформатора пакет выполняется из 32 медных труб диаметром 60/40 мм с четырехрядным коридорным расположением по 8 труб в вертикальном ряду с двумя средними рядами одной полярности. Такое расположение принято по соображениям простоты и удобства присоединения трубчатых пакетов к неподвижным башмакам, находящимся по обеим коротким сторонам самообжигающегося электрода прямоугольного поперечного сечения. Полный пакет доходит до ближней к трансформатору пары неподвижных башмаков, после чего пакет раздваивается — два ряда труб идут к двум неподвижным башмакам одного электрода, остальные два ряда идут дальше к аналогичным башмакам второго электрода.

На неподвижном и подвижном башмаках количество отверстий для крепления кабельных наконечников определяется количеством наконечников, т.е. в конечном счете сечением и типом применяемого гибкого кабеля. Для четырехниточных гирлянд с кабелями МГЭ-500 в

каждом башмаке этой печи сверлится 44 отверстия под 22 кабельных наконечника (по 11 наконечников с каждой стороны башмака). При аналогичных гирляндах с кабелями МГЭ-1000 число отверстий в башмаке сокращается до 32.

Подвижная жесткая часть токопровода на траверсе электрододержателя печи РПЗ-48 выполняется 16 медными трубами диаметром 60/40 мм, соединяющими два подвижных башмака с восемью контактными щеками (по 2 трубы на 1 щеку).

Трубчатые участки токопровода на рукавах электрододержателей дуговых сталеплавильных печей выполняются с разным числом труб в зависимости от мощности печи, схемы короткой сети и ряда конструктивных соображений. Для печей вместимостью до 25 т на каждом рукаве обычно прокладываются две медных трубы наружным диаметром до 60 мм.

При выборе количества и сечения токоведущих труб необходимо иметь в виду, что индуктивное сопротивление трубчатого некомпенсированного пакета в основном определяется формой и размерами контура, очерченного по наружным поверхностям труб в поперечном сечении токопровода.

При проработке конструкции трубчатого пакета на линейный ток 90 кА сравнивались два варианта: в первом варианте ток передается 8 трубами диаметром 100/70 мм, расположенными своими осями по двум противолежащим сторонам квадрата  $1000 \times 1000$  мм, а во втором — 4 трубами диаметром 180/150 мм, расположенными по углам такого же квадрата. Сечения медных труб подбирались так, чтобы в обоих вариантах иметь приблизительно одинаковые активные сопротивления при плотности тока около  $3 \text{ А/мм}^2$ . По данным расчетов индуктивное сопротивление труб в обоих вариантах практически одинаково, поэтому при выборе оптимального варианта следует руководствоваться в основном конструктивными соображениями, в частности, условиями присоединения труб к корпусу электрододержателя и к подвижному башмаку на хвостовой части рукава.

#### 4. Электрическая изоляция токопроводов

При любой схеме и конструкции короткой сети ее работоспособность в значительной мере зависит от надежности электрической изоляции.

Короткая сеть дуговой печи работает в специфических условиях, изложенных в гл. I. Шины жестких участков токопровода при естественном их охлаждении не могут иметь сплошную изоляцию, которая затрудняет отвод выделяющейся в шинах энергии и вызывает недопустимый их перегрев. Поэтому в шинных пакетах электрическая изоляция обычно осуществляется только в местах сжима шин. В пакетах с шинами одной полярности шины изолируются только от земли, а в пакетах с шинами разной полярности (в частности, в бифилярных пакетах), помимо изоляции от земли, осуществляется изоляция между шинами.

В качестве основного электроизоляционного материала в шинных пакетах, как правило, применяется асбестоцемент (иногда — стеклотекстолит) в виде плит необходимой толщины. Основные изоляционные прокладки между шинами обычно выполняются из доски толщиной 20 мм, а вспомогательные прокладки, заполняющие зазоры между основными прокладками за пределами шин иметь толщину, равную толщине шины.

Асбестоцемент представляет собой слоистый пластик холодной прессовки асбестовых волокон и портландцемента марки не ниже 400 и поставляется в виде плит прямоугольной формы с обработанной или необработанной поверхностью. При изготовлении изоляционных деталей из асбестоцемента в необходимых случаях следует предусматривать механическую обработку рабочих поверхностей плит с учетом их неровностей и допускаемых отклонений по толщине поставляемых плит.

Металлические детали сжима шинного пакета обычно выполняются из немагнитной стали или из силумина. Швеллер для стяжки пакета выгибается на прессе из листа толщиной около 5 мм. При монтаже коротких сетей нередко сжим шинных пакетов успешно осуществляется с использованием литых швеллеров из силумина, изготавливаемых электромонтажными предприятиями. В особых случаях сжимов тяжелых многошинных пакетов, особенно при отсутствии вспомогательных прокладок, швеллеры из алюминиевых сплавов могут оказаться недостаточно прочными.

Недостаточная жесткость швеллера в сжиме шинного пакета вызывает дополнительные местные нагрузки на электроизоляционные прокладки, что может привести к поломке прокладок и к нарушению изоляции.

При выборе материалов для электрической изоляции

токопроводов необходимо учитывать следующие моменты; максимально возможную температуру нагрева изоляции как за счет протекания тока по изолируемым проводникам, так и за счет теплового воздействия печи; соответствие механической прочности материала реальным механическим нагрузкам; надежность электрической изоляции; возможность получения материала и его стоимость.

Важнейшим качеством материала для электрической изоляции токопроводов дуговых печей является нагревостойкость, т. е. способность материала выполнять свои функции в условиях рабочей температуры в течение времени, соизмеримого с расчетным сроком нормальной эксплуатации электрооборудования, в котором применяется данный электроизоляционный материал. В отличие от нагревостойкости теплостойкость представляет собой максимальную температуру, которую выдерживает электроизоляционный материал при испытаниях, проводимых по определенной методике.

Из семи классов нагревостойкости электроизоляционных материалов по ГОСТ 8865—70 в коротких сетях дуговых печей преимущественное распространение имеют материалы, относящиеся к классам:

|                                |               |
|--------------------------------|---------------|
| <i>B</i> — с нагревостойкостью | 130 °C;       |
| <i>F</i> — »                   | 155 °C;       |
| <i>H</i> — »                   | 180 °C;       |
| <i>C</i> — »                   | более 180 °C. |

Основные технические данные некоторых электроизоляционных материалов приведены в табл. 2.4.

Детали электрической изоляции неподвижных участков токопровода от печного трансформатора до начала гибкого участка работают при температурах не выше 120 °C и подвергаются в основном сжимающим усилиям. В этих условиях для изоляции наиболее целесообразно применение досок из асбестоцемента (ширина 700 и 800 мм; длина 1100 и 1200 мм с допускаемыми отклонениями  $\pm 5$  мм).

В соответствии с ГОСТ 8865—70 доски имеют условное обозначение АЦЭИД (асбестоцементное электротехническое изделие дугостойкое). Пример условного обозначения доски марки 400 длиной 1200 мм, шириной 800 мм, толщиной 20 мм:

**АЦЭИД — 400—120×80×2,0 ГОСТ 4258—78.**

Асбестоцемент во влажном состоянии обладает сравнительно невысокими электроизоляционными свойствами.

| Наименование материала (ГОСТ)           | Плотность,<br>кг/дм³ | Толщина<br>материала, мм | Электри-<br>ческая<br>прочность,<br>кВ/мм | Удельное<br>объемное<br>электропро-<br>тивление,<br>Ом·м | Нагрево-<br>стойкость,<br>°С | Механические свойства          |                                                   |   | Ударная<br>вязкость,<br>кДж/м² |
|-----------------------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------|---|--------------------------------|
|                                         |                      |                          |                                           |                                                          |                              | прочность<br>на разрыв,<br>МПа | прочность<br>на стати-<br>ческий<br>изгиб,<br>МПа |   |                                |
| Доски асбестоцементные (ГОСТ 4248—78)   | 1,8—2,0              | 6—40                     | 1,5—2,0                                   | —                                                        | 500                          | —                              | 35—50                                             | — | 4—6                            |
| Стеклотекстолит (ГОСТ 12652—74) марки:  |                      |                          |                                           |                                                          |                              |                                |                                                   |   |                                |
| СТ                                      | 1,6—1,8              | 1,5—30                   | 5—9                                       | 10 <sup>12</sup> —10 <sup>13</sup>                       | 130                          | 70—90                          | 95—125                                            | — | 12—15                          |
| СТЭФ                                    | 1,6—1,9              | 1,5—50                   | 15—20                                     | 10 <sup>14</sup> —10 <sup>15</sup>                       | 155                          | 200—300                        | 280—320                                           | — | 50—60                          |
| СТК                                     | 1,6—1,8              | 0,5—30                   | 6—12                                      | 10 <sup>12</sup> —10 <sup>14</sup>                       | 180                          | 90—110                         | 95—125                                            | — | 12—15                          |
| Минерит гибкий (ГОСТ 6120—75) марки ГФК | 1,7—1,75             | 0,15—0,5                 | 19—23                                     | 10 <sup>13</sup> —10 <sup>15</sup>                       | 180                          | —                              | —                                                 | — | —                              |
| Слюдинит гибкий (ГОСТ 10715—76) марки:  |                      |                          |                                           |                                                          |                              |                                |                                                   |   |                                |
| Г <sub>2</sub> СК                       | 1,6                  | 0,2—0,3                  | 15—30                                     | 10 <sup>13</sup> —10 <sup>15</sup>                       | 155                          | —                              | —                                                 | — | —                              |
| Г <sub>2</sub> СКН                      | 1,8                  | 0,2—0,3                  | 15—30                                     | 10 <sup>13</sup> —10 <sup>15</sup>                       | 300                          | —                              | —                                                 | — | —                              |
| Стеклолакоткань (ГОСТ 10156—78) марки:  |                      |                          |                                           |                                                          |                              |                                |                                                   |   |                                |
| ЛСКЛ-155                                | 1,3—1,4              | 0,12—0,15                | 4—6                                       | 10 <sup>11</sup> —10 <sup>13</sup>                       | 155                          | 60—70                          | —                                                 | — | —                              |
| ЛСКР-180                                | 1,3—1,4              | 0,12—0,20                | 10—20                                     | 10 <sup>13</sup> —10 <sup>15</sup>                       | 180                          | 60—70                          | —                                                 | — | —                              |
| Микалекс                                | 2,8—3,0              | 3—50                     | 10—13                                     | 10 <sup>12</sup> —10 <sup>14</sup>                       | 350                          | 30—70                          | 50—75                                             | — | 2—5                            |
| Фторопласт                              | 2,1—2,3              |                          | 20—25                                     | 10 <sup>18</sup> —10 <sup>20</sup>                       | 250                          | 14—20                          | 11—14                                             | — | —                              |
| Электронит (ТУ 38-5-522—69)             | 1,5                  | 0,2—6,0                  | 5—7                                       | —                                                        | 280                          | 140                            | —                                                 | — | —                              |

ми ввиду его гигроскопичности, поэтому изоляционные детали из асбестоцемента при необходимости подвергаются пропитке или проварке.

В практике эксплуатации дуговых печей для изоляции токопроводов во многих случаях применяются не пропитанные детали из асбестоцемента. При этом влажные детали из асбестоцемента после включения печи на пониженном напряжении просушиваются естественным образом и обеспечивают достаточную электрическую изоляцию в рабочем режиме.

Электрическая изоляция подвижных жестких элементов токопровода, расположенных на конструкциях печей (трубы на траверсах электрододержателей рудно-термических печей и на рукавах электрододержателей сталеплавильных печей), работает при высоких температурах порядка 100—200 °С, а в отдельных случаях — до 300 °С и выше. При этом, в отличие от пакетов неподвижных участков токопровода, где детали основной изоляции имеют форму простых плит, в подвижных участках токопровода, помимо плит, применяются электроизоляционные втулки и шайбы для изоляции болтов и шпилек.

Для изготовления изоляционных трубок, втулок и шайб должны применяться теплостойкие материалы, сочетающие электроизоляционные свойства с высокой прочностью на сжатие и изгиб и поддающиеся механической обработке резанием. Из наиболее распространенных электроизоляционных материалов такими качествами обладают некоторые марки стеклотекстолита и микалекс.

Стеклотекстолит представляет собой твердый материал, получаемый прессованием из многих слоев ткани из стеклянного волокна, пропитанной терморезистивной смолой. Изготавливается в виде листов шириной 450—980 мм и длиной 600—1480 мм с предельными отклонениями  $\pm 35$  мм при стороне листа менее 930 мм и  $\pm 50$  мм при стороне листа 930 мм и более.

Микалекс представляет собой твердую пластмассу на основе молотой слюды. Выпускаемый в виде листов, пластин и прутков микалекс обладает нагревостойкостью до 300 °С и хорошо поддается всем видам механической обработки.

Стеклотекстолит и микалекс могут поставляться в виде плит, листов, стержней и толстостенных трубок. В частности, нагревостойкие трубки ТСЭ из стеклотекстолита

на эпоксидной связке выпускаются с внутренним диаметром 10—80 мм, длиной до 750 мм с различными толщинами стенки. Из этого же материала выпускаются цилиндры ЦСЭ диаметром 85—200 мм, длиной 650, 750 и 850 с технологическими отверстиями, образующимися от оправки для намотки стеклоткани.

Из различных марок гибкого миканита, выпускаемого по ГОСТ 6120—75, в табл. 2.4 приведена только одна марка ГФК, обладающая нагревостойкостью 180 °С. Миканит поставляется листами шириной и длиной от 450 до 900 мм, толщиной 0,2—0,5 мм. По соглашению поставщика и потребителя возможна поставка листов больших толщин.

Выпускаемый по ГОСТ 10715—76 гибкий слюдинит марок Г<sub>2</sub>СК и Г<sub>2</sub>СКН (нагревостойкий) представляет собой композицию из стеклянной ткани или сетки, слюдинитовой бумаги и кремнийорганического лака. Размеры листов устанавливаются по согласованию поставщика с потребителем (минимальные размеры 500 × 600 мм).

Электронит, выпускаемый по ТУ 38-5-552-69 в виде листов размерами 1000 × 1200 мм, представляет собой электроизоляционный материал высокой нагревостойкости и прочности на разрыв. Из электронита целесообразно изготовление смягчающих прокладок в сочетании с жесткими плитами из асбестоцемента или стеклотекстолита.

Стеклолакоткань по ГОСТ 10156-78 марки ЛСКЛ-155 (последняя буква Л означает — липкая) выпускается шириной 10—30 мм с упаковкой в виде роликов диаметром до 175 мм, а марки ЛСКР-180 — шириной 690—1140 мм в виде рулонов.

Для работы при температурах 300 °С и выше в настоящее время еще нет доступных для промышленного применения электроизоляционных материалов, сочетающих изоляционные свойства с высокой механической прочностью и возможностью механической обработки. Поэтому узлы электрической изоляции, расположенные в зонах высоких температур, необходимо защищать от перегрева при помощи надежного теплового экранирования или за счет непосредственного водяного охлаждения изолируемых деталей.

При конструировании узлов с электрической изоляцией рекомендуется руководствоваться следующими соображениями:



1) детали изоляции по возможности не должны испытывать изгибающих и срезающих усилий;

2) изолируемый болт или шпилька должны быть легко заменяемыми в случае нарушения изоляции или по другим причинам (в частности, не следует допускать изолированных болтов и шпилек, заворачиваемых в резьбовое гнездо стационарной металлоконструкции, так как при этом чрезвычайно затрудняется ремонт узла, особенно после пробоя изоляции);

3) размеры изоляционной шайбы (толщина и внешний диаметр) должны быть такими, чтобы обеспечить требуемое нормами расстояние от металлической детали под напряжением до заземленной детали или до металлической детали под напряжением другой полярности;

4) не следует применять тонкие шайбы и тонкостенные трубки из миканита, обладающие неудовлетворительной стойкостью в механическом отношении вследствие расслаивания и выдавливания связки при больших усилиях сжатия (взамен их целесообразно применять массивные прочные детали, не склонные к расслаиванию);

5) свободный доступ к узлам электрической изоляции при профилактических осмотрах и ремонтах;

6) максимальное унифицирование деталей электрической изоляции, в частности, сведение к минимуму номенклатуры трубок по диаметрам и шайб по толщине, что играет существенную роль как при изготовлении, так и при эксплуатации дуговых электропечей.

На рис. II.11, а показан в двух вариантах узел изоляции находящегося под напряжением фланца цилиндра, прикрепленного к заземленному корпусу каретки дуговой сталеплавильной печи. Первый вариант представляет собой неудачное решение узла электрической изоляции с глухой шпилькой, вворачиваемой в резьбовое гнездо корпуса. В случае пробоя изоляции с неизбежным при этом оплавлением шпильки ее замена является длительной трудоемкой операцией.

Во втором варианте взамен шпильки применяется сквозной болт, замена которого в аварийных условиях не представляет затруднений (болт разрезается газовым резаком и удаляется без труда). Кроме того, болтовое соединение на проход гарантирует более надежную двустороннюю изоляцию болта. Для монтажа и демонтажа болтового соединения в этом случае требуется наличие вспомогательного окна в стенке корпуса каретки.

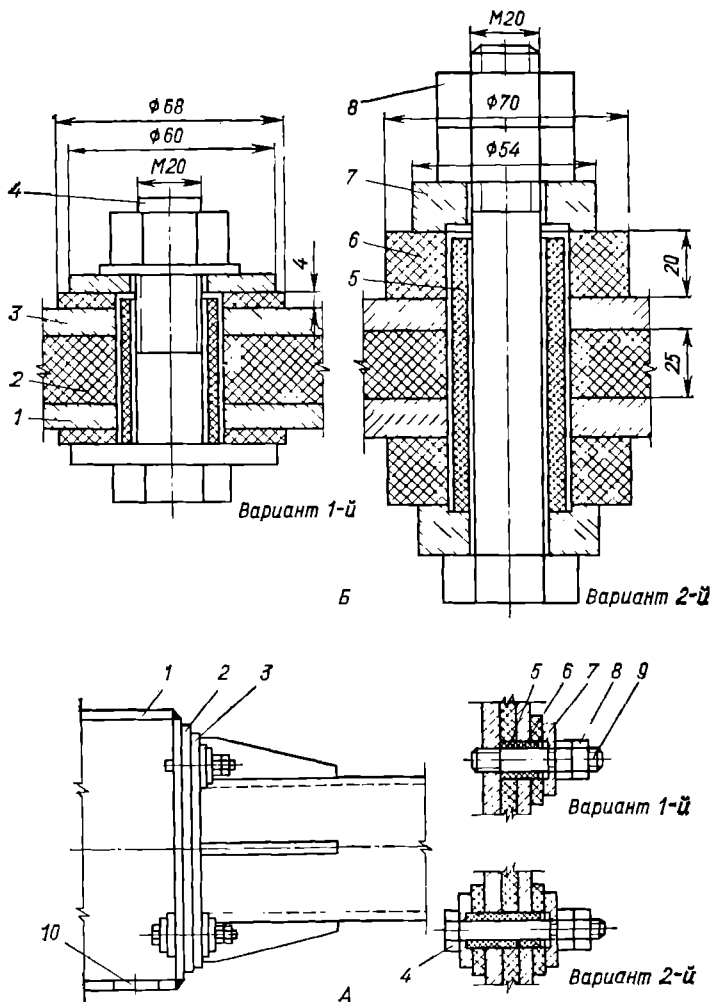


Рис. II.11. Примеры конструктивных решений узлов электрической изоляции: А — крепление фланца цилиндра к каретке дуговой сталеплавильной печи; Б — детальный разрез узла изоляции с болтовой стяжкой; 1 — конструкция заземленная; 2 — изоляционная плита; 3 — конструкция под напряжением; 4 — болт; 5 — изоляционная трубка; 6 — изоляционная шайба; 7 — специальная металлическая шайба; 8 — гайка; 9 — шпилька; 10 — окно для монтажа

Приведенный пример показывает, что порой незначительным изменением конструкции узла электрической изоляции можно существенно повысить надежность работы узла и резко сократить время ремонта, то есть длительность простоя дуговой печи.

На рис. II.11, б дан в двух вариантах детальный разрез узла изоляции с болтовой стяжкой. В первом варианте при изоляционной шайбе толщиной 4 мм путь перекрытия по поверхности электрической изоляции составляет всего 8 мм, что значительно меньше минимально допустимого (20 мм). Кроме того, в этом варианте металлическая шайба вызывает значительное концентрированное усилие прижима к изоляционной шайбе по внутреннему контуру ее отверстия. По указанным причинам первый вариант решения узла является неудачным.

Во втором варианте значительно увеличен путь поверхностного перекрытия за счет применения толстой изоляционной шайбы, а специальная усиленная металлическая шайба обеспечивает равномерное распределение усилия прижатия к изоляционной шайбе.

Помимо удовлетворительного решения узлов электрической изоляции для надежной работы короткой сети необходимо принимать меры по механической защите токопроводов от случайного попадания на них посторонних предметов, способных вызвать короткое замыкание.

В руднотермических печах это особенно важно для неподвижных шинных или трубчатых пакетов расположенных в плавильном цехе между стеной печной подстанции и печью, поскольку короткие замыкания на этом участке являются наиболее опасными для печного трансформатора. Шинные пакеты защищаются сверху подвешенными металлическими экранами, а снизу достаточно естественной защиты трубами водяного охлаждения печи.

Ошиновка вторичной стороны трансформатора дуговой сталеплавильной печи вместе с неподвижными башмаками короткой сети не требует специальной защиты, за исключением участка на выходе из окна подстанции, который целесообразно защитить сверху съемными козырьками для удобства проведения монтажных и ремонтных работ.

В процессе эксплуатации пакетов из водоохлаждаемых труб иногда наблюдается отпотевание поверхности токоведущих труб, что обычно вызывается излишним расходом охлаждающей воды при небольших плотностях тока в трубах, особенно при невысоких температурах ок-

ружающей среды. При этом на влажные поверхности труб налипает пыль, что может привести к короткому замыканию пакета. Для борьбы с этим явлением можно рекомендовать допустимое сокращение расхода воды на охлаждение труб, а в отдельных случаях (при малых плотностях тока в холодное время года) — исключение водяного охлаждения.

Показателем достаточного расхода охлаждающей воды является ее температура на выходе, которую рекомендуется поддерживать в пределах (ориентировочно) 50—60 °С.

В качестве дополнительной страховки для повышения надежности работы короткой сети рекомендуется обмотка токоведущих труб по всей длине тонким слоем прочной электроизоляционной ткани. В частности, на жестком неподвижном участке токопровода электропечи РПЗ-48 медные трубы диаметром 60/40 мм обматываются двумя слоями липкой стеклоленты толщиной 0,2 мм с полупотным перекрытием при намотке каждого слоя.

Обмотку токоведущих труб следует рассматривать не как самостоятельную расчетную электрическую изоляцию, а лишь как вспомогательное мероприятие.

В пакетах из большого количества токоведущих труб необходимо обращать серьезное внимание на конструктивное решение электрической изоляции в узлах сжима и подвески пакетов.

Конструкция узла должна обеспечивать стяжку пакета с устранением зазоров между трубами и разделительными изоляционными плитами во избежание вибрации отдельных труб пакета, которая может вызвать аварийное нарушение работы узла. Для устранения зазоров могут использоваться полужесткие прокладки из листов электронаита толщиной 3—4 мм.

В отдельных случаях опасные в смысле возможности коротких замыканий участки пакетов из водоохлаждаемых труб заливают бетоном. Однако возникающие при этом осложнения при демонтаже и ремонтах токопроводов не дают оснований рекомендовать бетонирование для широкого применения. Бетонирование обычно выполняется на участках в зоне воздействия высоких температур, например, на полузакрытых карбидных печах при расположении шинопровода под зонтом.

Максимальная надежность в эксплуатации обеспечивается при конструктивных решениях с так называемой «безвтулочной изоляцией». При такой системе, разрабо-

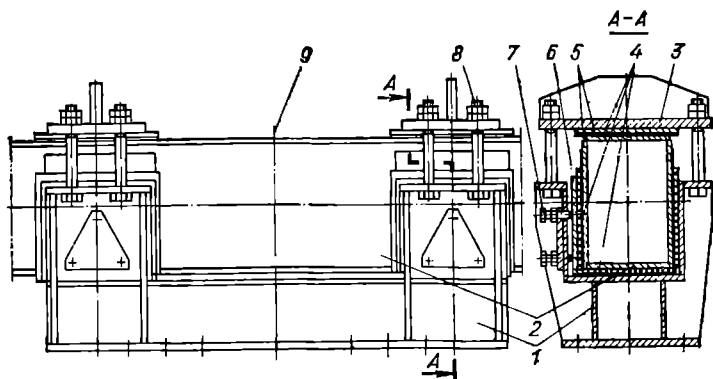


Рис. II.12. Безвулочная изоляция рукава электрододержателя от металлоконструкции колонны:

1 — постель (опорная конструкция на колонне электрододержателя); 2 — рукав; 3 — крышка; 4 — плита асбестоцементная; 5 — лист миканитовый; 6 — пластина; 7 — болт нажимной; 8 — болт стяжной; 9 — ось колонны электрододержателя

танной и успешно внедренной работниками ЧМК, токо-  
ведущий элемент (или элемент, не обтекаемый током, но  
находящийся под напряжением) охватывается изолиру-  
ющим материалом таким образом, что крепежные детали  
узла не требуют электрической изоляции. На рис. II.12  
показана безвулочная изоляция рукава электрододержа-  
теля печи ДСП-50. Рукав 2, находящийся под напряже-  
нием, изолируется от заземленной опоры 1 асбестоце-  
ментными плитами 4 и миканитовыми листами 5.

Горизонтальное сжатие узла электрической изоляции  
осуществляется болтами 7 через пластину 6 в виде листа  
из маломагнитной стали, а в вертикальном направлении  
узел сжимается болтами 8. Смысл дополнительной изо-  
ляции тонкими миканитовыми листами (их рекоменду-  
ется приклеивать к асбестоцементным плитам) заключа-  
ется в том, что миканит обеспечивает надежную работу  
узла и в случае возникновения трещин в асбестоцемент-  
ных плитах с необработанными поверхностями, прижи-  
маемыми с большими усилиями к также необработанным  
поверхностям металлоконструкции опоры.

При оценке минимально допустимого электрического  
сопротивления изоляции короткой сети нужно учитывать,  
что общее сопротивление электрической изоляции между  
фазами короткой сети или между одной из фаз и землей  
определяется рядом факторов, из которых главными яв-  
ляются:

а) величины удельного поверхностного электрического сопротивления материалов, из которых выполняются основные детали электрической изоляции;

б) величины промежутков между проводниками разных фаз или между проводниками фазы и землей;

в) площади поверхностей соприкосновения фаз с электрической изоляцией.

Первые два фактора практически не зависят от типа-размера и мощности печи, так как они в основном обусловлены номенклатурой и качеством применяемых электроизоляционных материалов и нормированными размерами изоляционных промежутков.

Третий фактор существенно зависит от размеров печи и мощности трансформатора — чем они больше, тем больше суммарная величина площади поверхностей соприкосновения фаз с электрической изоляцией.

Поэтому нельзя ожидать одинаковых величин сопротивления электрической изоляции для дуговых печей разных размеров и мощности. С увеличением размеров печей и мощности трансформаторов электрическое сопротивление изоляции короткой сети при прочих равных условиях снижается.

Практика эксплуатации дуговых печей показывает, что в рабочем режиме (при разогретой и высушенной изоляции) сопротивление изоляции имеет величину порядка 50 кОм для печей мощностью 4—5 МВ·А и порядка 5 кОм для печей мощностью 40—50 МВ·А, а непросушенная изоляция может иметь сопротивление ниже указанных величин в 10 и более раз.

Измерение электрического сопротивления изоляции между фазами короткой сети производится при отключенных от выводов трансформатора вторичных токопроводах и при отсутствии касания электродов шихты или заземленных металлоконструкций.

Включение печи с непросушенной изоляцией короткой сети, имеющей низкое электрическое сопротивление, обычно производится на самой низкой ступени напряжения печного трансформатора с последующим повышением напряжения по мере увеличения сопротивления изоляции.

## **5. Гибкие участки токопровода**

Соединение подвижного и неподвижного участков токопровода установки дуговой печи чаще всего осуществляется гибкими медными проводами (кабелями), а иногда

гибкими медными лентами. Для этой цели применяются голые медные кабели и медные кабели в резинотканевых рукавах. В первом случае кабели работают с естественным охлаждением, а во втором случае кабели, как правило, имеют искусственное водяное охлаждение. В отдельных редких случаях для малонагруженных гибких участков токопроводов применяются изолированные кабели с естественным охлаждением.

Наиболее простым в изготовлении и надежным в эксплуатации является участок гибкого токопровода из голых медных кабелей. Однако при рабочих токах в несколько десятков килоампер применение голых кабелей связано со значительными трудностями, обусловленными тем, что при ограниченной допустимой плотности тока порядка 1—1,5 А/мм<sup>2</sup> гибкий участок токопровода должен выполняться из множества кабелей с весьма неравномерным распределением тока между ними из-за эффекта близости и с неблагоприятными условиями естественного охлаждения кабелей. Рассредоточение кабелей для борьбы с эффектом близости и для улучшения условий их охлаждения приводит к тому, что размеры поперечного сечения кабельной гирлянды настолько возрастают, что она становится чрезвычайно громоздкой и неконструктивной.

При использовании голых кабелей предусматриваются дистанционные устройства в виде электроизоляционных клиц или перегородок во избежание коротких замыканий между гирляндами разных фаз и от гирлянд на землю.

Основные данные голых медных проводов по ГОСТ 20685—75, применяемых в гибких участках токопроводов отечественных дуговых печей, приведены в табл. 2.5.

На рис. II.13 показана гирлянда из четырех проводов МГЭ-500 и заделка проводов в наконечнике. Такие гирлянды и аналогичные им гирлянды с проводами МГЭ-1000 применяются в токопроводах многих руднотермических печей, например, электропечей РКО-16,5, РКЗ-16,5 и РПЗ-48. Провода МГЭ-500 и МГЭ-1000 обычно заделываются в кабельные наконечники по одному кабелю (иногда в одно гнездо наконечника впаивается два кабеля МГЭ-500). По усилию, необходимому для обеспечения хорошего электрического контакта, крепление наконечника с проводом МГЭ-1000 или со спаренным проводом МГЭ-500 может осуществляться одним болтом диаметром не менее 20 мм, однако для

ТАБЛИЦА 2.6

## ХАРАКТЕРИСТИКА ГОЛЫХ МЕДНЫХ ПРОВОДОВ ТИПА МГЭ

| Сечение провода, мм <sup>2</sup> |           | Номинальный диаметр проволоки, мм | Число проволок | Расчетный диаметр, мм |         | Электросопротивление провода, Ом/км | Расчетная масса провода, кг/км |
|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|----------------|-----------------------|---------|-------------------------------------|--------------------------------|
| номинальное                      | расчетное |                                   |                | сердечника            | провода |                                     |                                |
| 240                              | 238,57    | 0,73                              | 570            | 11,0                  | 26,6    | 0,07760                             | 2370                           |
| 300                              | 293,97    | 0,76                              | 648            | 9,5                   | 28,7    | 0,06295                             | 2780                           |
| 400                              | 394,85    | 0,70                              | 1026           | 10,5                  | 31,5    | 0,04695                             | 3795                           |
| 500                              | 490,26    | 0,78                              | 1026           | 11,7                  | 35,1    | 0,03772                             | 4740                           |
| 1000                             | 1010,82   | 1,12                              | 1026           | 16,7                  | 50,3    | 0,01826                             | 9310                           |

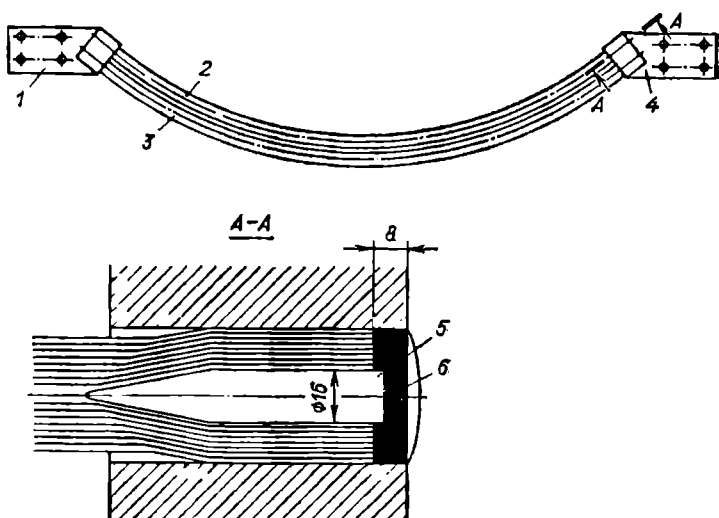


Рис. II.13. Гирлянда из четырех кабелей МГЭ-500 с естественным охлаждением:

1 — наконечник левый (латунное или бронзовое литье); 2 — кабель внутренний (2 шт.); 3 — кабель внешний (2 шт.); 4 — наконечник правый; 5 — клин (материал — медь или немагнитная сталь); 6 — твердый припой типа ПМЦ

восприятия момента от боковых усилий при наклонах и поворотах гирлянд крепление наконечника должно осуществляться не менее чем двумя болтами.

Наиболее тяжелые условия работы голых кабелей имеют место на открытых и полужакрытых руднотерми-



ческих печах, где, помимо мощного теплового излучения и омывания пламенем, кабели подвергаются вредному химическому воздействию выделяющихся из печи газов и пыли.

Поскольку кабели с естественным охлаждением не могут быть удовлетворительно защищены от теплового и химического воздействия со стороны колошника печи, здесь весьма целесообразно применение водоохлаждаемых кабелей. При этом защита резиноканевой оболочки кабеля от теплового излучения и пламени может быть осуществлена при помощи материалов, обладающих высокой теплостойкостью (асбестовое полотно, стеклоткань на кремнийорганической связке и др.).

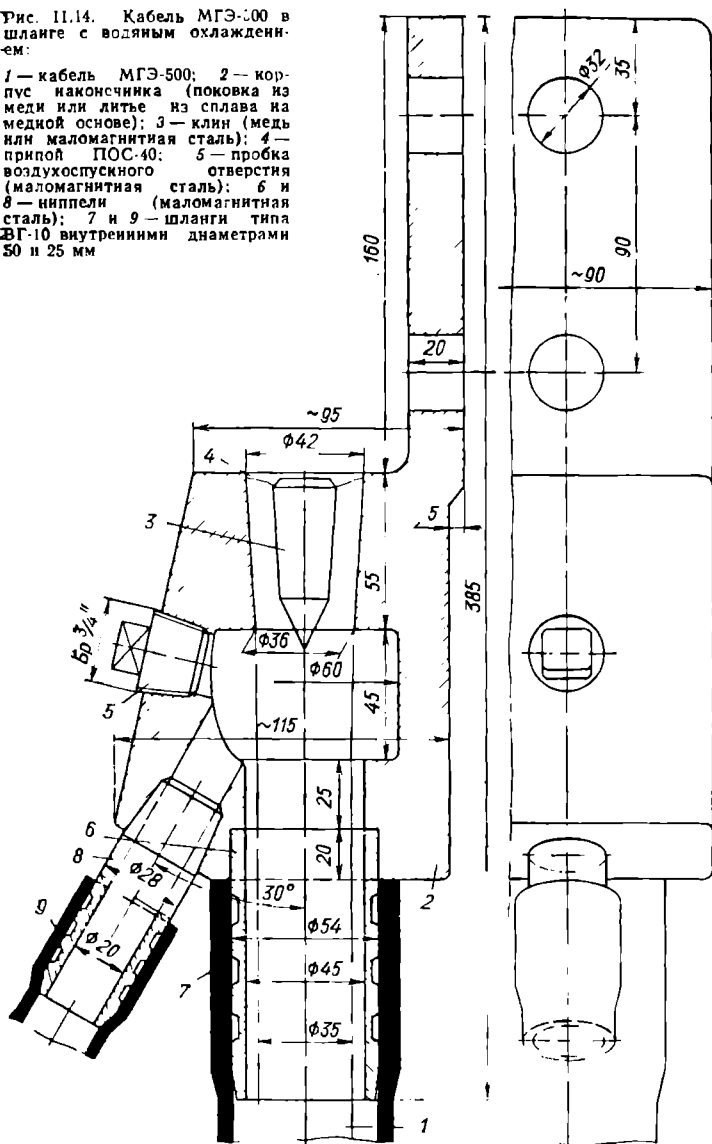
Водоохлаждаемые кабели обладают в сравнении с толстыми значительно большей нагрузочной способностью. Если голый кабель по условиям допустимого нагрева обычно работает с плотностью тока до  $1,5 \text{ А/мм}^2$ , то водоохлаждаемый кабель может работать без допустимого перегрева при практически неограниченной плотности тока порядка  $10 \text{ А/мм}^2$  и выше. Оптимальная плотность тока для водоохлаждаемого кабеля должна выбираться на основании технико-экономического расчета по условию минимума годовых эксплуатационных расходов, складывающихся в основном из стоимости амортизации кабеля и стоимости энергии электрических потерь в кабеле за срок его службы. С увеличением плотности тока уменьшаются расходы на амортизацию кабеля, но увеличивается стоимость электроэнергии, теряемой в нем.

В практике эксплуатации дуговых печей плотность тока в водоохлаждаемых кабелях колеблется в широких пределах — от 2 до  $8 \text{ А/мм}^2$ . Для предварительного выбора количества и сечения водоохлаждаемых кабелей рекомендуется ориентироваться на плотности тока  $2,5—4,5 \text{ А/мм}^2$ . При этом необходимо учитывать условия размещения кабелей в гирляндах как с точки зрения возможно большей равномерности распределения тока между отдельными кабелями, так и в смысле возможности уменьшения реактивного сопротивления гирлянды.

Конструктивные решения водоохлаждаемых кабелей, применяемых в дуговых печах, весьма разнообразны. На рис. II.14 показан водоохлаждающий кабель на базе провода МГЭ-500, помещенного в стандартный резиноканевый рукав внутренним диаметром 50 мм. Аналогично может использоваться провод МГЭ-1000 в рукаве диаметром 65 мм.

Рис. 11.14. Кабель МГЭ-500 в шланге с водяным охлаждением:

1 — кабель МГЭ-500; 2 — корпус наконечника (поковка из меди или литье из сплава на медной основе); 3 — клин (медь или маломagnetная сталь); 4 — припой ПОС-40; 5 — пробка воздухопускного отверстия (маломagnetная сталь); 6 и 8 — ниппели (маломagnetная сталь); 7 и 9 — шланги типа ВГ-10 внутренними диаметрами 50 и 25 мм



Конец провода расклинивается в коническом гнезде специального наконечника, после чего торец провода заливается мягким припоем. В случае непоправимого повреждения рукава при хорошем состоянии провода производится засверловка заделки провода в наконечнике, снятие наконечника и рукава, замена рукава и повторная заделка провода. Потеря длины кабеля при каждом таком ремонте составляет не более 100 мм, что позволяет многократную замену изношенного рукава до потери работоспособности провода.

На рис. II.15 показан водоохлаждаемый кабель с использованием провода МГЭ-1000, помещенного в стандартный резиноканевый рукав внутренним диаметром 65 мм. В этой конструкции роль наконечника выполняет специально обработанная медная труба диаметром 60/30 мм, в которую впаивается конец провода. На ниппель штуцера с внутренней резьбой насаживается рукав, а между медной трубой и штуцером осуществляется сальниковое уплотнение при помощи нажимной гайки, вворачиваемой во внутреннюю резьбу штуцера. В случае износа рукава при сохранности провода перемонтаж кабеля в новый рукав осуществляется без распайки и отрезки конца провода.

Необходимым условием надежной работы водоохлаждаемых кабелей является высокая механическая прочность и износостойкость резиноканевых рукавов, подверженных в процессе эксплуатации печи, помимо нагрузок от кручения и изгиба, ударам и истиранию.

Специальная конструкция водоохлаждаемого кабеля КВС-650 сечением 650 мм<sup>2</sup> Бердянского завода «Азовкабель» показана на рис. II.16. Опорой для навивки жилы кабеля (сердечником) является пружина внутренним диаметром 40 мм из нержавеющей стали диаметром 4 мм. На эту пружину наносится медная жила в виде двух или трех чулков из медной проволоки диаметром около 0,5 мм. Кабели этого типа обладают весьма прочной в механическом отношении резиновой оболочкой с капроновым кордом, нанесенной с вулканизацией на внешний чулок из медных проволок.

По данным опыта эксплуатации в дуговых сталеплавильных печах кабели типа КВС имеют следующие существенные недостатки:

а) слабая заделка оболочки кабеля в гнезде наконечника не обеспечивает герметичности системы водоохлаждения при наличии боковых механических нагрузок,

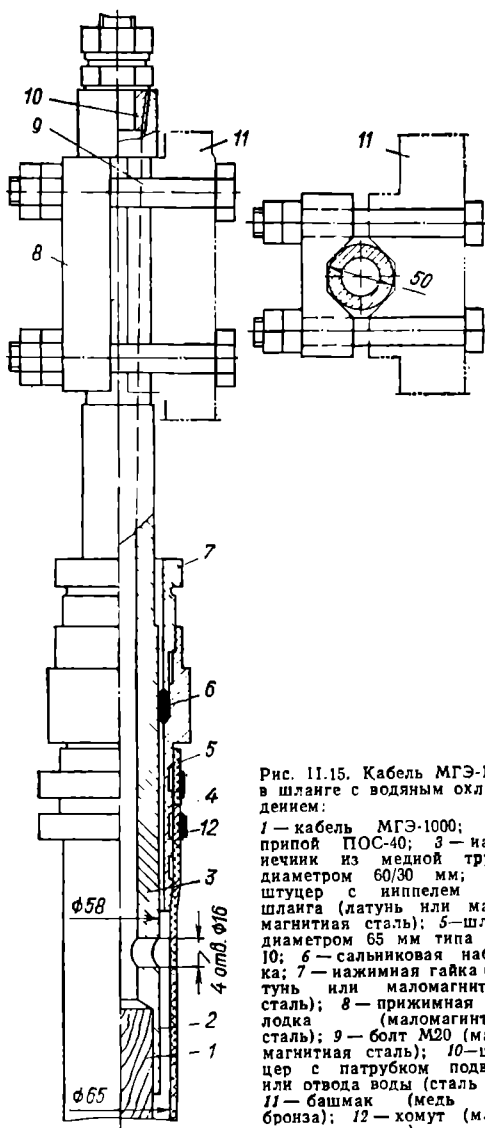


Рис. 11.15. Кабель МГЭ-1000 в шланге с водяным охлаждением:

1 — кабель МГЭ-1000; 2 — припой ПОС-40; 3 — накопчик из медной трубы диаметром 60/30 мм; 4 — штуцер с ниппелем для шланга (латунь или маломагнитная сталь); 5 — шланг диаметром 65 мм типа ВГ-10; 6 — сальниковая набивка; 7 — нажимная гайка (латунь или маломагнитная сталь); 8 — прижимная колюдка (маломагнитная сталь); 9 — болт М20 (маломагнитная сталь); 10 — штуцер с патрубком подвода или отвода воды (сталь 20); 11 — башмак (медь или бронза); 12 — комут (маломагнитная сталь)

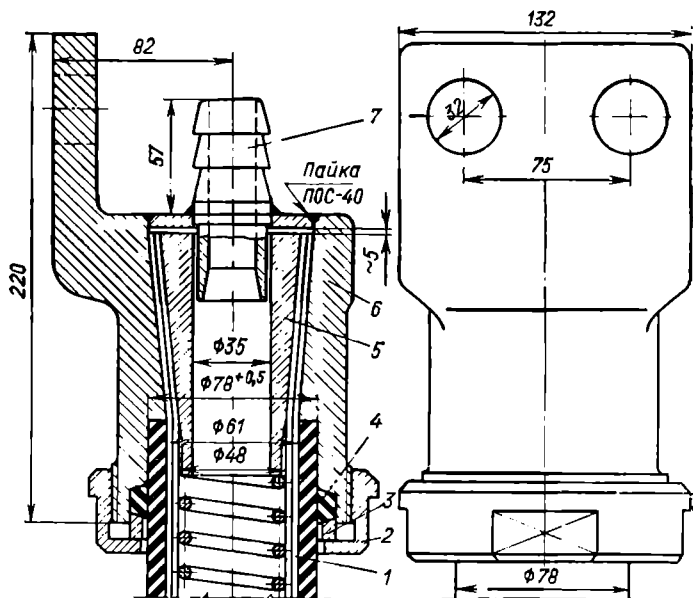


Рис. II.16. Кабель КВС-650 с наконечником:

1 — кабель КВС-650; 2 — нажимная гайка (маломагнитная сталь); 3 — нажимное кольцо (маломагнитная сталь); 4 — уплотнительное кольцо (резина); 5 — коническая втулка (маломагнитная сталь); 6 — корпус наконечника (литье из бронзы или латуни); 7 — ниппель с крышкой (сталь 3)

возникающих в процессе наклона и поворота кабельных гирлянд;

б) несовершенная система охлаждения (протекающая через кабель вода не может омывать наиболее нагруженную током наружную часть медной жилы);

в) при местных повреждениях медной жилы (что наблюдается обычно через несколько месяцев с начала эксплуатации кабеля) весь кабель приходит в негодное состояние, поскольку отделить сохранившуюся часть медной жилы и реставрировать кабель невозможно.

Кабели типа КВС удовлетворительно работают на электропечах со спокойным режимом при медленных вертикальных перемещениях электрододержателей, например, в установках для электрошлакового переплава. Токпроводящая жила водоохлаждаемого кабеля КСВ ДСП 2100 сечением 2100 мм<sup>2</sup> состоит из опорной пружины (сердечника), выполненной из стальной нержавеющей

проводами диаметром 4—5 мм, трех последовательно наложенных на нее повивов из медных проводов сечением 16 мм<sup>2</sup> и одного повива из медных проводов сечением 6 мм<sup>2</sup>. Наконечник кабеля со сквозным продольным каналом для прохода воды имеет цилиндрическую хвостовую часть, на которую насаживается резинотканевый рукав внутренним диаметром 102 мм, и присоединительную часть в виде доски толщиной 50 мм и шестью крепежными отверстиями диаметром 18 мм с шагом 60 мм в продольном и поперечном направлениях.

В кольцевую чашу хвостовой части наконечника вводятся все провода токоведущей жилы и заливаются мягким припоем.

Плотное обжатие резинотканевого рукава на цилиндрической части наконечника осуществляется специальными хомутами из немагнитной стали или лентой посредством специального натяжного устройства.

По опыту эксплуатации электропечей ДСП-100 НЗА основным недостатком кабеля КСВ ДСП-2100 является малая механическая прочность и отсутствие надежной защиты от теплового излучения круглотканного рукава, выпускаемого по ТУ 38-105798—75, не предназначенного для специфических условий работы кабелей в установках дуговых сталеплавильных печей.

На 150-т электропечах фирмы Крупп, установленных на Оскольском электрометаллургическом комбинате (ОЭМК), используются водоохлаждаемые кабели сечением 4800 мм<sup>2</sup> фирмы Флое (ФРГ). Токоведущая часть этого кабеля состоит из 20 гибких медных проводов сечением 240 мм<sup>2</sup>, а сердечником является гибкий резиновый рукав, вокруг которого производится закручивание проводов на несколько оборотов. С целью уменьшения истирания медных проводов при изгибах и перемещениях кабелей на 10 проводов (через один) надеваются тонкостенные перфорированные гибкие трубки. Оболочкой кабеля является прочный резинотканевый рукав с внешним теплозащитным покрытием асбестовой тканью. Аналогичный кабель сечением 4000 мм<sup>2</sup> этой же фирмы имеет токоведущую часть из десяти медных гибких проводов сечением 400 мм<sup>2</sup>.

В табл. 2.6 приведены основные технические данные некоторых типов водоохлаждаемых кабелей, используемых в отечественных дуговых печах при напряжении до 1000 В.

При конструировании коротких сетей необходимо

ТАБЛИЦА 2.6

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ  
ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ КАБЕЛЕЙ

| Типы кабелей                                                  | Номинальное сечение<br>кабеля, мм <sup>2</sup> | Расчетное сопротивление<br>кабеля<br>при 50 Гц и 30 °С,<br>R мкОм/м | Диаметр<br>токоведущей<br>части, мм |            | Наружный диаметр<br>кабеля, мм | Расчетная масса<br>кабеля с водой,<br>кг/м | Минимальный<br>внутренний радиус<br>изгиба кабеля, мм |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------|--------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|                                                               |                                                |                                                                     | наружный                            | внутренний |                                |                                            |                                                       |
| Провод МГЭ-500<br>в рукаве диаметром<br>50 мм                 | 500                                            | 0,044                                                               | 35,1                                | 11,7       | 65                             | 8,0                                        | 600                                                   |
| Провод МГЭ-1000<br>в рукаве диаметром<br>65 мм                | 1000                                           | 0,022                                                               | 50,3                                | 16,7       | 83                             | 14,3                                       | 750                                                   |
| Кабель КВС-650                                                | 650                                            | 0,031                                                               | 64                                  | 48         | 78                             | 11,2                                       | 600                                                   |
| Кабель КВС-1000                                               | 1000                                           | 0,021                                                               | 72                                  | 48         | 90                             | 15,0                                       | 750                                                   |
| Кабель КСВ ДСП<br>2100                                        | 2100                                           | —                                                                   | 84                                  | 46         | 113                            | 34                                         | 900                                                   |
| Кабель сечением<br>4000 мм <sup>2</sup> фирмы<br>«Флое» (ФРГ) | 4000                                           | —                                                                   | 135                                 | 70         | 180                            | 65                                         | 1100                                                  |

иметь в виду, что в гибких участках токопровода должны обеспечиваться в определенных пределах заданные расстояния между отдельными кабелями в реальных условиях эксплуатации печи. Это обуславливает необходимость обеспечения относительной стабильности геометрии гибкого участка токопровода как при отсутствии токовой нагрузки, так и при различных ее значениях, вплоть до эксплуатационных коротких замыканий. При отсутствии достаточно надежной фиксации взаимного расположения обтекаемые током проводники под действием электродинамических сил меняют взаимное расположение, вследствие чего повышается активное и особенно реактивное сопротивление гибкого участка токопровода. Особенно существенно это сказывается в длинных гибких участках токопроводов дуговых сталеплавильных печей. В кабельных гирляндах, несущих полные линейные токи, не представляет серьезных затруднений фиксировать взаиморасположение кабелей при помощи дистанцирующих клин и таким образом обеспечить относительную стабильность геометрии гирлянд.

В отдельных конструкциях мощных дуговых сталеплавильных печей с целью снижения индуктивного сопротивления находят применение схемы короткой сети,

в которых по кабельным гирляндам протекают фазные токи или разделенные пополам линейные токи, причем смежные гирлянды с токами разных направлений стремятся помещать по возможности ближе друг к другу. В пределах одной фазовой или полulinейной гирлянды кабели фиксируются клицами, но, поскольку смежные гирлянды идут к разным электрододержателям, перемещающимся независимо друг от друга, надежно фиксировать взаиморасположение смежных гирлянд практически невозможно. Следствием этого является значительное раскачивание кабельных гирлянд в период расплавления, в результате чего увеличивается индуктивное сопротивление гибкого участка токопровода и нарушается стабильность режима работы печи.

Для гибких участков токопроводов современных сверхмощных дуговых печей большой вместимости характерно применение небольшого количества массивных водоохлаждаемых кабелей крупных сечений (не более 4 шт. на фазу). В пределах одной гирлянды кабели удерживаются на фиксированном расстоянии друг от друга посредством резиновых муфт, надеваемых на оболочку кабеля с шагом около 0,8—1,0 м (предпочтительны муфты из двух половин с обжимом вокруг оболочки кабеля при помощи ленты или проволоки из немагнитного металла). Значительному раскачиванию кабельных гирлянд от электродинамических усилий между токами разных фаз препятствует массивность кабелей и триангулированное расположение гирлянд.

## 6. Компенсаторы

Присоединение концевых участков короткой сети к выводам печного трансформатора обычно осуществляется через компенсаторы (иначе называемые демпферами), представляющие собой короткие пакеты из тонких медных лент и выполняющие две основные функции:

а) облегчение условий присоединения шин или труб пакета жесткого участка токопровода к выводам трансформатора при наличии неизбежных в изготовлении и монтаже отклонений от проектных размеров;

б) разгрузка выводов трансформатора от дополнительных механических нагрузок, возникающих вследствие термических расширений жесткого участка токопровода в процессе эксплуатации печи.

При оценке возможных воздействий линейного расширения шинного пакета на выводы трансформатора не-



обходимо иметь в виду, что удлинение пакета может происходить не только в сторону трансформатора, но и в противоположную сторону, то есть в направлении к неподвижным башмакам, к которым присоединяются кабельные гирлянды гибкой части токопровода.

Опыт эксплуатации показывает, что выводы отечественных и зарубежных печных трансформаторов выдерживают значительные механические нагрузки без нарушения плотности бака, что достигается за счет достаточно устойчивой конструкции шинных и трубчатых выводов с надежным их уплотнением. Поэтому главным критерием необходимости применения компенсаторов следует считать условия присоединения пакетов шин или труб короткой сети к выводам трансформатора. При качественной подгонке сочленения отдельных шин или труб с выводами трансформатора компенсаторы, как правило, не требуются.

Одним из конструктивных мероприятий для осуществления непосредственного жесткого присоединения шин прямоугольного сечения к аналогичным выводам печного трансформатора является выполнение прорезных отверстий взамен обычных сверлений под болты для стяжки отдельных шин. При этом если на выводах трансформатора направление прорезей будет продольным (вдоль оси шины), то на шинах короткой оси оно должно быть поперечным. Это дает возможность установки стяжных болтов при наличии отклонений (в пределах разумных допусков) координат осей отверстий в пакетах шин и в выводах как в горизонтальном направлении (вдоль пакета), так и по вертикали.

На рис. II.17 показаны присоединение шин и труб токопровода к выводам трансформатора через компенсаторы и типовая конструкция компенсатора Московского электрозавода. Заготовкой такого компенсатора является полоса медной фольги толщиной 0,3 мм. Травленая фольга наматывается на оправку из тонколистовой стали длиной, приблизительно равной требуемой длине компенсатора. Количество витков намотки определяется шириной фольги и требуемой величиной поперечного сечения компенсатора. После намотки оправка удаляется, концевые участки компенсатора обжимаются, пропаиваются мягким припоем типа ПОС-40, засверливаются и облуживаются. Средняя (гибкая) часть компенсатора выгибается по заданному радиусу. Пропайку концевых участков целесообразно производить в специальных

клетках с контактным нагревом. Ширину компенсаторов рекомендуется принимать не более 150 мм. Для шин шириной 300 мм могут быть использованы два компенсатора шириной 150 мм или три компенсатора шириной 100 мм.

Для трубчатого вывода (рис. II.17, III) с контактной муфтой КМ и трубчатым коленом ТК присоединение ши-

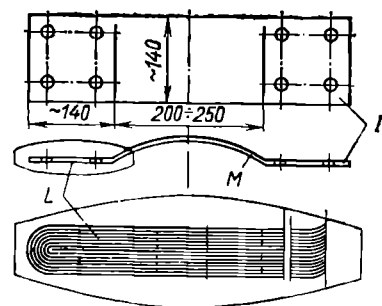
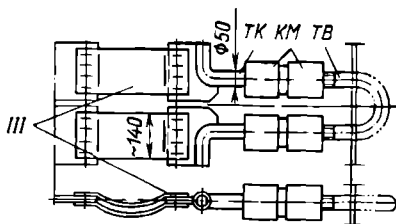
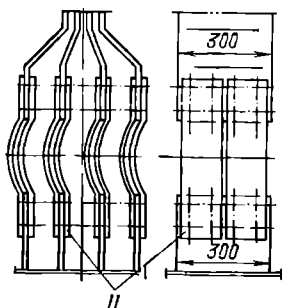


Рис. II.17. Присоединение жесткого участка токопровода к выводам трансформатора через компенсаторы:

I — к шинным выводам; II — к трубчатым выводам; III — компенсатор к шинному выводу сечением  $300 \times 12$  мм, намотанный из медной травленной фольги толщиной 0,3 мм; L — участок пайки и лужения; M — гибкая часть компенсатора; Г — медная колодка для присоединения к токоведущей трубе наружным диаметром 50 мм



ны непосредственно или через компенсатор осуществляется к медной пластине, приваренной к трубчатому колену. Один ряд болтов этого контакта достаточен, учитывая, что контакт расположен вблизи охлаждаемой водой медной трубы.

При выполнении шинного моста водоохлаждаемыми трубами присоединения ошиновки к компенсаторам или непосредственно к выводам трансформатора производится посредством медных пластин, привариваемых к трубам ошиновки.

При конструировании, изготовлении и монтаже компенсаторов необходимо учитывать, что, защищая выво-

ды трансформатора от дополнительных механических нагрузок, компенсаторы могут явиться причиной серьезной аварии из-за короткого замыкания непосредственно у выводов трансформатора.

Во избежание коротких замыканий на компенсаторах рекомендуется: не допускать чрезмерной длины гибкой части компенсатора; исключить возможность обратного выгиба компенсатора в процессе эксплуатации короткой сети; между смежными компенсаторами разной полярности устанавливать или подвешивать электроизоляционные перегородки, стойкие в тепловом и механическом отношении.

Поскольку компенсаторы являются элементами, усложняющими изготовление короткой сети и снижающими надежность ее эксплуатации, их применение должно обосновываться действительной необходимостью с учетом конкретного устройства выводов печного трансформатора и конструктивных решений шинных пакетов короткой сети.

### **Глава III**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОРОТКИХ СЕТЕЙ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ**

### **1. Общие положения**

Современная тенденция развития руднотермических печей характеризуется не строительством новых более мощных печных установок, а реконструкцией действующих с целью увеличения их производительности, что соответствует решениям XXVII съезда КПСС.

Номинальная мощность руднотермических печей составляет 5000; 8000; 16500; 22500; 63000; 80000 кВ·А. Печи оснащаются электропечными трансформаторами, номинальная мощность которых в МВ·А должна соответствовать размерному ряду ГОСТ 9680—77Е (10,0; 12,5; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0; 100,0; 125,0; 160,0; 200,0; 250,0). Из этого ряда видно, что мощности размерного ряда трансформаторов и электропечей не всегда совпадают.

В настоящей главе справочника рассмотрены рудно-термические печи, охватывающие круглые трехэлектродные печи для производства ферросплавов, фосфора, карбида кальция в диапазоне мощностей 4,5—81 МВ·А, трехэлектродные прямоугольные печи для производства карбида кальция мощностью 40—80 МВ·А, а также печи цветной металлургии мощностью 4,5—33 МВ·А. Печи размерного ряда мощностью 100—150 МВ·А и выше не рассматриваются, так как на ближайшее время они не являются перспективными.

Конструктивные данные, электрические параметры и электрические характеристики вышеуказанных печей малой, средней и большой мощности, полученные экспериментально и в результате расчетов сведены в соответствующие таблицы, и являются основой при рассмотрении различных вариантов при выборе рациональных типов рудно-термических печей, а также критерием, по которому могут оцениваться конкретные параметры вновь создаваемых конструкций и реконструируемых печных установок. Отсутствие таких данных в литературе в значительной степени затрудняло эту работу.

Методика расчета параметров коротких сетей изложена в главах V и VI. Для повышения средневзвешенного  $\cos \varphi$  мощных электропечей до величины 0,92—0,95 для всех типов печей (кроме фосфорных) применяются установки емкостной компенсации реактивной мощности (продольной или поперечной), которые обеспечивают колебания  $\cos \varphi$  в диапазоне 0,88—0,95 при всех режимах печи на максимальной мощности.

Рабочие токи, напряжения и мощности конденсаторных батарей выбирались в соответствии с методикой, изложенной в гл. VIII. В мощных печах отечественного производства применены установки продольно-емкостной компенсации (УПК). В таблицах основных конструктивных элементов число проводников приведено для полюс-фазы, плотность тока соответствует максимальному рабочему току элемента.

Мощность конденсаторной батареи печей, оборудованных УПК, определялась для среднего рабочего тока ( $Q_{\text{ср}}$ ) и для режима максимального тока ( $Q_{\text{max}}$ ). Последняя определяет установленную мощность конденсаторной батареи (см. главу VIII). Кроме того, для печных установок, оборудованных УПК, определялась полная мощность печи  $S_e$  и естественный коэффициент мощ-

ности, который бы имела печь без УПК, потребляющая ту же сетевую мощность  $P_{\text{с.ср}}$ :

$$S_e = \sqrt{P_{\text{с.ср}}^2 + I_{\text{ср}}^2 x_y},$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{\text{с.ср}}}{S_e},$$

где  $I_{\text{ср}}$  — среднее значение тока в электроде;  $x_y$  — реактивное сопротивление фазы печной установки.

Следует иметь в виду, что мощность печного трансформатора для печи без УПК должна была бы быть на 10—15 % больше величины  $S_e$ , приведенной в табл. 3.9, так как ее выбор проводился бы для режима с максимальным рабочим током.

Определяющим элементом в значении суммарного реактивного сопротивления электропечных установок является сопротивление ее ванны и электродов, что видно из табл. 3.5, которая составлена по результатам расчетов параметров всех рассматриваемых печей. Для ферросплавных и электрокорундовых печей реактивное сопротивление ванны и электродов составляет 40—60 %, для печей химической электротермии — 30—50 %, для печей цветной металлургии — 20 %.

По мере роста мощности относительное реактивное сопротивление трансформатора и короткой сети падает, а ванны и электродов — растет. Распределение активных сопротивлений сохраняется независимо от мощности (табл. 3.5).

## 2. Типы действующих руднотермических печей и их общие характеристики

В табл. 3.1 приведены общие характеристики наиболее распространенных в СССР типов руднотермических печей для производства ферросплавов, карбида кальция, желтого фосфора, белого электрокорунда и некоторых печей цветной металлургии. В таблице приняты условные наименования типов печных установок, которыми они обозначаются во всех разделах справочника. В этих условных обозначениях: Р — класс руднотермических печей, К — круглые печи, П — прямоугольные печи, О — открытые печи, З — закрытые печи, третья буква П — полужакрытые печи. Цифра в обозначении типа печи соответствует установленной мощности трансформатора или предельной мощности печи, а последующие буквы К, Ф, ЭК или Ц обозначают карбидные, фосфорные,

электрокорундовые печи или печи цветной металлургии. Буква *y* обозначает, что печи оборудованы установками продольно-емкостной, а УП — установками поперечно-емкостной компенсации реактивной мощности. Все печи оборудованы самообжигающимися электродами, за исключением печей для производства белого корунда и титанистых шлаков, а также некоторых печей цветной металлургии (РКО-7,9ц), которые имеют графитированные электроды. Рафинировочные и некоторые другие печи для производства ферросплавов работают так же с графитированными электродами.

Данные в табл. 3.1 охватывают руднотермические печи мощностью 4,5—81 МВ·А.

В группе ферросплавных установок приведены типы печей мощностью 4,5—11,5 МВ·А и современные круглые трехэлектродные печи с открытым и закрытым колошником мощностью 14,0—81,0 МВ·А, а также их модификации, появившиеся после проведения реконструкции этих печей и их усовершенствования.

Особое внимание обращено на печи большой единичной мощности, требующие для улучшения их электрических характеристик применения установок искусственной компенсации реактивной мощности (поперечной или продольной).

В табл. 3.1 приводятся характеристики ферросплавных печей РКЗ-80,0/у и РПЗ-80,0/у, а также характеристики карбидных печей РПЗ-80к/у, РКЗ-80к/у, создание которых предполагается в будущем.

В группе карбидных печей представлены печи малой (3,0 МВ·А), средней (7,5—15,0 МВ·А) и большой мощности (40—80 МВ·А) с отсосом реакционного газа изпод колошника. Следует отметить, что ванны печей средней мощности эксплуатировались при мощностях, больших, чем те, на которые они были запроектированы. Поэтому путем реконструкции короткой сети и печного трансформатора их мощность была повышена с 5,5—7,0 МВ·А до 10—20 МВ·А. Печь типа РПО-60к представляла ранее печь мощностью 40 МВ·А. На печи РПО-40к с целью увеличения ее производительности был установлен трансформатор мощностью 60 МВ·А.

В группе фосфорных печей приведены примеры современных герметизированных печных агрегатов мощностью 10,5—80,0 МВ·А. Все печи, за исключением печи РКЗ-50ф, отечественного производства созданы за последние 15—20 лет. Печь 13,8 МВ·А в настоящее время

## ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕЙСТВУЮЩИХ РУДНОТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

| № п/п                     | Тип печной установки | Мощность трансформатора, МВ·А | Основной производимый продукт | Схема соединения короткой сети | Ванна                  |                             |                                | Трансформатор                              |
|---------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------|
|                           |                      |                               |                               |                                | расход электр. доз, мн | диаметр (ширина, длина), мм | внутренние размеры глубина, мм |                                            |
| 1                         | 2                    | 3                             | 4                             | 5                              | 6                      | 7                           | 8                              | 9                                          |
| <i>Ферросплавные печи</i> |                      |                               |                               |                                |                        |                             |                                |                                            |
| 1                         | РКО-4,5              | 4,5                           | Рафинированный феррохром      | Звезда на трансформаторе       | 1300                   | 5820                        | 1610                           | Трехфазный                                 |
| 2                         | РКО-9,0              | 9,0                           | Ферросиликохром               | Треугольник на электродах      | 2550                   | 4750                        | 2100                           | Трехфазный, два трансформатора в параллель |
| 3                         | РКО-10,5             | 10,5                          | Ферросилиций Cu75             | То же                          | 2500                   | 4400                        | 1990                           | Трехфазный                                 |
| 4                         | РКО-10,5             | 10,5                          | Феррохром                     | »                              | 2500                   | 5100                        | 2200                           | »                                          |
| 5                         | РКО-11,0             | 11,15                         | Ферромарганец                 | Звезда на трансформаторе       | 2100                   | 7500×2700                   | 1900                           | »                                          |
| 6                         | РКО-11,5             | 11,5                          | Ферросиликохром               | Треугольник на шинном пакете   | 2250                   | 5500                        | 1700                           | »                                          |
| 7                         | РКО-14,0             | 13,95                         | То же                         | Треугольник на электродах      | 2550                   | 5400                        | 2045                           | »                                          |
| 8                         | РКО-14,3             | 14,3                          | »                             | То же                          | 2400                   | 4900                        | 2100                           | »                                          |
| 9                         | РКО-15,0             | 15,07                         | Сяликокальций                 | »                              | 2500                   | 4700                        | 2000                           | »                                          |
| 10                        | РКО-16,5             | 16,5                          | Ферросилиций Cu75             | »                              | 2900                   | 6150                        | 2300                           | Три однофазных с одной стороны печи        |
| 11                        | РКО-16,5             | 16,5                          | Феррохром                     | »                              | 2800                   | 5550                        | 2000                           | То же                                      |
| 12                        | РКО-16,5             | 16,5                          | Ферросиликохром               | »                              | 3000                   | 5300                        | 2100                           | »                                          |

|    |               |      |                   |                           |      |            |      |                                                  |
|----|---------------|------|-------------------|---------------------------|------|------------|------|--------------------------------------------------|
| 13 | РКЗ-16,5      | 16,5 | Ферросилиций      | »                         | 2900 | 6150       | 2300 | Три однофазных с одной стороны печи              |
| 14 | РКЗ-16,5      | 16,5 | Силикомарганец    | »                         | 2900 | 6650       | 2800 | »                                                |
| 15 | РКЗ-16,5/V    | 16,5 | »                 | »                         | 2900 | 6650       | 2800 | »                                                |
| 16 | РКО-20,0      | 20,0 | Ферросилиций      | »                         | 2700 | 5700       | 2200 | Трехфазный с верхним токоподводом                |
| 17 | РКО-20,0      | 20,0 | Si75              | »                         | 2700 | 5380       | 2180 | То же с глубоким боковым вводом токоподвода      |
| 18 | РКЗ-21,0      | 21,0 | »                 | »                         | 2900 | 6150       | 2300 | Три однофазных с одной стороны печи              |
| 19 | РКЗ-22,5      | 22,5 | Ферросилиций      | »                         | 2900 | 5800       | 2400 | То же                                            |
| 20 | РКЗ-27,5/V    | 27,5 | Si25              | »                         | 3700 | 7890       | 2900 | »                                                |
| 21 | РКО-29,0      | 29,0 | Ферросилиций      | »                         | 2900 | 5800       | 2400 | Трехфазный с глубоким боковым вводом токоподвода |
| 22 | РКЗ-40,0/V    | 40,0 | То же             | »                         | 3900 | 8800       | 3500 | Три однофазных с одной стороны печи              |
| 23 | РПЗ-63,0/V**  | 63,0 | Силикомарганец    | Шестилэлектродная         | 3300 | 20350×6000 | 2860 | То же                                            |
| 24 | РКЗ-81,0/VII  | 81,0 | Силикомарганец    | Треугольник на электродах | 5658 | 12600      | 5000 | »                                                |
| 25 | РКЗ-80,0/y*** | 80,0 | 18 % Ферросилиций | То же                     | 5400 | —          | —    | »                                                |
| 26 | РПЗ-80,0/y*** | 80,0 | Силикомарганец    | Шестилэлектродная         | 3600 | —          | —    | »                                                |

Карбидные печи

| 1 | РПО-3, Ок | 3,0 | Карбид кальция | Треугольник на электродах | 1500 | 4850×2050 | 1600 | Трехфазный (два в параллель) |
|---|-----------|-----|----------------|---------------------------|------|-----------|------|------------------------------|
|---|-----------|-----|----------------|---------------------------|------|-----------|------|------------------------------|



| 1                               | 2             | 3     | 4               | 5                                         | 6    | 7         | 8         | 9                                |
|---------------------------------|---------------|-------|-----------------|-------------------------------------------|------|-----------|-----------|----------------------------------|
| 2                               | РПО-7,5к      | 7,5   | Карбид кальция  | Звезда на транс-<br>форматоре             | 2200 | 7470×3130 | 1800      | Трехфазный                       |
| 3                               | РПО-10к       | 10,0  | То же           | То же                                     | 2400 | 8150×3700 | 1800      | То же                            |
| 4                               | РПО-15к       | 15,0  | »               | »                                         | 2400 | 8150×3700 | 1800      | »                                |
| 5                               | РПО-40к       | 40,0  | »               | »                                         | 2400 | 8500×6300 | 2650      | »                                |
| 6                               | РПО-40к       | 40,0  | »               | Треугольник на<br>электродах              | 2400 | 8500×6300 | 2650      | »                                |
| 7                               | РПО-60к       | 60,0  | »               | Звезда на транс-<br>форматоре             | 2400 | 8500×6300 | 2650      | »                                |
| 8                               | РП-60к        | 60,0  | »               | То же                                     | 2800 | 9350×6900 | 3000      | »                                |
| 9                               | РПЗ-80,0к/у   | 80,0  | »               | »                                         | 2800 | 9350×6900 | 3000      | »                                |
| 10                              | РКЗ-80,0к/у   | 80,0  | »               | »                                         | 4400 | 10 800    | 4400      | »                                |
| <i>Фосфорные печи</i>           |               |       |                 |                                           |      |           |           |                                  |
| 1                               | РКЗ-10,5ф     | 10,5  | Фосфор          | Треугольник на<br>подвижных баш-<br>маках | 2600 | 5500      | 3000      | »                                |
| 2                               | РКЗ-13,8ф     | 13,75 | То же           | То же                                     | 3150 | 5900      | 3350      | »                                |
| 3                               | РКЗ-33ф       | 33,0  | »               | »                                         | 3500 | 7700      | 4000      | Три однофазных под<br>углом 120° |
| 4                               | РКЗ-48ф       | 50,0  | »               | »                                         | 4000 | 8500      | 4300      | То же                            |
| 5                               | РКЗ-50ф       | 50,0  | »               | »                                         | 3750 | 7800      | 4200      | »                                |
| 6                               | РКЗ-72ф (80ф) | 80,0  | »               | »                                         | 4800 | 10 200    | 5100—5650 | »                                |
| <i>Печи цветной металлургии</i> |               |       |                 |                                           |      |           |           |                                  |
| 1                               | РКЗ-4,5ц      | 4,5   | Свинец-цинк     | Треугольник на<br>электродах              | 1950 | —         | 3000      | Трехфазный                       |
| 2                               | РКЗ-5,0ц      | 5,0   | Титанистый шлак | Шестиелектродная                          | 4450 | 3560      | —         | То же                            |

|                               |            |      |                               |                                       |      |            |      |                                     |
|-------------------------------|------------|------|-------------------------------|---------------------------------------|------|------------|------|-------------------------------------|
| 3                             | РКО-7,9ц   | 9,0  | Моноксид никеля               | Треугольник на шинном пакете          | 1200 | 3500       | 2870 | »                                   |
| 4                             | РКЗ-10,5ц  | 10,5 | Титанистый шлак               | Треугольник на электродах             | 5570 | 4550       | —    | »                                   |
| 5                             | РПЗ-12ц    | 12,0 | Медно-никелевый штейн         | Шестиугольная                         | —    | —          | —    | »                                   |
| 6                             | РПЗ-20ц    | 20,0 | То же                         | Треугольник на шинном пакете          | 3400 | 13860×5800 | 4100 | »                                   |
| 7                             | РПЗ-30ц    | 30,0 | »                             | Треугольник на электродах             | 3000 | 11200×5200 | 4200 | »                                   |
| 8                             | РПЗ-33ц    | 33,0 | Медный штейн                  | Шестиугольная                         | 3200 | 22740×5730 | 5000 | Три однофазных с одной стороны печи |
| <b>Электрокорундовые печи</b> |            |      |                               |                                       |      |            |      |                                     |
| 1                             | РКО-1,3эк  | 1,3  | Электрокорунд-циркониевый     | Треугольник на выводах трансформатора | 1650 | 3000       | 700  | Трехфазный                          |
| 2                             | РКЗ-1,6эк  | 1,6  | Электрокорунд-хромититанистый | То же                                 | 1100 | 2650       | 1400 | То же                               |
| 3                             | РКО-1,9эк  | 1,9  | Электрокорунд-циркониевый     | »                                     | 1650 | 3000       | 700  | »                                   |
| 4                             | РКЗ-4,5эк  | 4,5  | Электрокорунд-хромититанистый | »                                     | 1400 | 3400       | 1200 | »                                   |
| 5                             | РКЗ-5,5эк  | 5,5  | Электрокорунд-белый           | Треугольник на подвижных башмаках     | 1400 | 4600       | 1600 | »                                   |
| 6                             | РКЗ-6,6эк  | 6,6  | То же                         | Треугольник на электродах             | 1250 | 4600       | 1600 | »                                   |
| 7                             | РКО-10,5эк | 10,5 | Электрокорунд нормальный      | То же                                 | 2400 | 5400       | 1800 | »                                   |
| 8                             | РКО-16,5эк | 16,5 | То же                         | »                                     | 3000 | 7340       | 3000 | Три однофазных с одной стороны печи |

\* Для печей с круглыми ваннами приводится диаметр распада (Др) электродов, а для печей с прямоугольными ваннами расстояние между осями электродов. \*\* В документации завода-изготовителя РПЗ-48. \*\*\* В документации завода-изготовителя соответствует РПЗ-63 и РПЗ-63.

ТАБЛИЦА 3.2

## ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПЕЧНЫХ

| Номер печной<br>установки (по<br>табл. 3.1) | Тип печной<br>установки | Тип трансформатора | Максималь-<br>ная мощ-<br>ность<br>( $S_{max}$ ),<br>МВ·А | Схема и<br>группа<br>соедине-<br>ния |
|---------------------------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1                                           | 2                       | 3                  | 4                                                         | 5                                    |

## Ферросплав

|        |            |                   |         |            |
|--------|------------|-------------------|---------|------------|
| 1      | РКО-4,5    | ЭТП-6300/10       | 4,50    | Δ / Δ — 11 |
| 2      | РКО-9,0    | ЭТП-10000/10*     | 2×4,50  | Δ / Δ — 0  |
| 3, 4   | РКО-10,5   | ЭТП-10000/10Р     | 10,50   | Δ / Δ — 0  |
| 5      | РПО-11,0   | Импортный         | 11,15   | Δ / Δ — 11 |
| 6      | РКО-11,5   | »                 | 11,50   | Δ / Δ — 0  |
| 7      | РКО-14,0   | ЭТП-15000/10Р     | 13,95   | То же      |
| 8      | РКО-14,3   | ЭТП-15000/35Р     | 14,30   | » »        |
| 9      | РКО-15,0   | ЭТП-15000/10Р     | 15,07   | » »        |
| 10, 15 | РКО-16,5   | ЭОЦН-8200/10(И1)* | 3×5,50  | » »        |
| 16, 17 | РКО-20,0   | ЭБТП-20000/10Р    | 20,0    | » »        |
| 18     | РКО-21,0   | ЭОЦН-8200/10Р     | 3×7,00  | » »        |
| 19     | РКЗ-22,5   | ЭОЦН-8200/10Р     | 3×7,50  | » »        |
| 20     | РКЗ-27,5   | ЭОЦНК-2100/10     | 3×9,166 | » »        |
| 21     | РКО-29,0   | ЭТЦН-36000/10     | 29      | » »        |
| 22     | РКЗ-40,0/у | ЭОЦНК-27000/110*  | 3×13,3  | Δ / Δ — 0  |
| 23     | РПЗ-63,0/у | ЭОЦНК-40000/150*  | 3×21,0  | Δ / Δ — 11 |
| 24     | РКЗ-81/уп  | Импортный         | 3×27,0  | Δ / Δ — 0  |
| 25     | РКЗ-80/у   | ЭОДЦНК-83300/220* | 3×26,7  | Δ / Δ — 11 |
| 26     | РПЗ-80/у   | ЭОЦНК-83000/150*  | 3×26,7  | Δ / Δ — 11 |

## Карбид

|      |           |               |       |            |
|------|-----------|---------------|-------|------------|
| 1    | РПО-3,0к  | ЭТМ-1500/10   | 1,50  | Δ / Δ — 0  |
| 2    | РПО-7,5к  | ТМД-7500/6    | 7,45  | Δ / Δ — 11 |
| 3    | РПО-10,0к | ЭТП-10000/35Р | 10,00 | То же      |
| 4    | РПО-15,0к | ЭТП-16500/35Р | 15,00 | »          |
| 5    | РПО-40,0к | Импортный     | 40,00 | »          |
| 6    | РПО-40,0к | ЭПТП-40000/35 | 40,00 | »          |
| 7, 8 | РПО-60,0к | Импортный     | 60,00 | »          |

## Фосфор

|   |           |                |       |           |
|---|-----------|----------------|-------|-----------|
| 1 | РКЗ-10,5ф | ЭТПХ-10000/35* | 10,5  | Δ / Δ — 0 |
| 2 | РКЗ-13,8ф | ЭТП-21000/35   | 13,75 | »         |

# ТРАНСФОРМАТОРОВ РУДНОТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

| Первичное напряжение $U_{вн}$ , кВ | Линейные токи стороны ВН, $I_{л}$ , А | Фазные токи стороны НН, $I_{ф}$ , кА | Диапазон линейных напряжений стороны НН, $U_{н.н}$ , В | Диапазон линейных токов стороны НН $I_{л}$ , кА |
|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 6                                  | 7                                     | 8                                    | 9                                                      | 10                                              |

## ные печи

|      |             |                |                   |                   |
|------|-------------|----------------|-------------------|-------------------|
| 10,0 | 260,0—185,0 | 7,0            | 370,0—252,0       | 7,0               |
| 10,5 | 247,7       | 8,4—13,4       | 178,0—89,0        | 14,6—28,2         |
| 10,0 | 606,9       | 22,2           | 158,0—105,5       | 38,4              |
| 10,0 | 644,5       | 45,0           | 143,0—122,5       | 45,0              |
| 10,5 | 633,0       | 24,0           | 160,0             | 41,6              |
| 10,0 | 806,3       | 28,9           | 161,0—130,5       | 50,0              |
| 35,0 | 236,1       | 27,3—29,5      | 174,0—161,0—133,0 | 47,3—51,1—51,1    |
| 10,0 | 871,0       | 33,5           | 150,0—134,0       | 58,0              |
| 10,0 | 953,7       | 26,9—34,7—34,7 | 204,0—158,5—130,0 | 46,5—60,0—60,0    |
| 10,5 | 1100,0      | 33,9           | 197,0—162,0       | 58,6              |
| 10,0 | 1214,0      | 34,3—43,3—43,3 | 204,0—161,5—133,5 | 59,3—75,0—75,0    |
| 10,0 | 1300,0      | 35,7—45,4—45,4 | 210,5—157,0—136,0 | 61,7—78,5—78,5    |
| 10,0 | 916,7       | 39,8—56,4      | 230,4—185,2—140   | 68,8—85,6—97,5    |
| 10,0 | 1380—1595   | 46,5           | 226—180           | 80,5              |
| 110  | 217,4       | 46,4—63,4—63,4 | 287,4—210,4—147,4 | 80,5—109,5—109,5  |
| 154  | 236,5       | 88,04—111,84   | 238,5—188—137     | 88,04—111,84      |
| 154  | 175         | 79,4—93,1      | 340—296—180       | 137,6—161,1       |
| 230  | 201         | 82,15—106,8    | 325—250—175       | 142—185—185       |
| 154  | 300,3       | 102,3—140,5    | 260—190—120       | 102,3—140,5—140,5 |

## ные печи

|      |       |           |             |           |
|------|-------|-----------|-------------|-----------|
| 10,5 | 82,5  | 5,32      | 94,0        | 9,21      |
| 6,0  | 720,0 | 17,30     | 121,0—149,0 | 28,9      |
| 31,5 | 183,5 | 37,8      | 153,0—127,0 | 37,8      |
| 31,5 | 275,2 | 51,0—54,0 | 170,0—138,0 | 51,0—54,0 |
| 31,5 | 733,0 | 88,8      | 260,0—130,0 | 88,8      |
| 31,5 | 660,5 | 50,9      | 262,5—130,8 | 88,1      |
| 110  | 315,0 | 119,45    | 290,0—130,0 | 119,45    |

## ные печи

|    |       |      |           |       |
|----|-------|------|-----------|-------|
| 35 | 173,4 | 11,1 | 316—211   | 19,2  |
| 35 | 225,0 | 14,9 | 307—110,3 | 25,85 |

| Номер печной установки (по табл. 3.1) | Тип печной установки | Тип трансформатора | Максимальная мощность ( $S_{\max}$ ), МВ·А | Схема и группа соединения |
|---------------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------------------------------|---------------------------|
| 1                                     | 2                    | 3                  | 4                                          | 5                         |
| 3                                     | РКЗ-33ф              | ЭОЦНК-21000/35     | 33,0                                       | $\Delta/\Delta-0$         |
| 4                                     | РКЗ-48ф              | ЭОЦНС-30000/35     | $3 \times 16,7$                            | »                         |
| 4, а                                  | РКЗ-48ф              | ЭОЦН-33300/35*     | $3 \times 16,7$                            | »                         |
| 5                                     | РКЗ-50ф              | Импортный          | $3 \times 16,7$                            | »                         |
| 6                                     | РКЗ-72ф (80ф)        | ЭОЦНК-54000/110*   | $3 \times 26,7$                            | »                         |

*Печи цветной*

|   |          |                |      |                   |
|---|----------|----------------|------|-------------------|
| 1 | РКО-7,9ц | ЭТЦПК-13500/10 | 9,0  | $\Delta/\Delta-0$ |
| 2 | РПЗ-20ц  | ЭТЦН-32000/35* | 20,0 | $\Delta/\Delta-0$ |

*Электрокорун*

|   |            |                   |                |                    |
|---|------------|-------------------|----------------|--------------------|
| 1 | РКО-1,3эк  | КОН-831/10        | 1,3            | $\Delta/\Delta-11$ |
| 2 | РКЗ-1,6эк  | ЭТЦН-2100/10      | 1,6            | $\Delta/\Delta-11$ |
| 3 | РКО-1,9эк  | КОН-831/10        | 1,9            | $\Delta/\Delta-0$  |
| 4 | РКЗ-4,5эк  | ЭТЦП-10000/10*    | 4,5            | $\Delta/\Delta-11$ |
| 5 | РКЗ-5,5эк  | ЭТЦП-7500/6р      | 5,5            | $\Delta/\Delta-12$ |
| 6 | РКЗ-6,6эк  | ЭТЦП-7500/6р      | 6,6            | $\Delta/\Delta-12$ |
| 7 | РКО-10,5эк | ЭТЦХ-16000/35*    | 10,5           | $\Delta/\Delta-0$  |
| 8 | РКО-16,5эк | ЭОЦН-8200/10(И2)* | $3 \times 5,5$ | $\Delta/\Delta-0$  |

| Номер печной установки (по табл. 3.1) | Число ступеней напряжения | Регулировка ступеней напряжения | Напряжение ступеней, В | Потери                                 |
|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------|----------------------------------------|
|                                       |                           |                                 |                        | ток холостого хода $I_{\text{хх}}$ , % |
| 1                                     | 11                        | 12                              | 13                     | 14                                     |

*Ферросплав*

|      |   |              |             |            |
|------|---|--------------|-------------|------------|
| 1    | 5 | Без нагрузки | —           | —          |
| 2    | 5 | То же        | 178,0—89,0  | 17,20—0,49 |
| 3, 4 | 8 | »            | 158,0—105,0 | 3,9—0,51   |
| 5    | 5 | »            | 143         | —          |
| 6    | 1 | »            | 160,0       | 16,3       |
| 7    | 3 | »            | —           | —          |
| 8    | 9 | »            | 168,0—133,0 | —          |
| 9    | 5 | »            | 150,0       | —          |

| Первичное напряжение $U_{ВН}$ , кВ | Линейные токи стороны ВН, $I_{Л}$ , А | Фазные токи стороны НН, $I_{Ф}$ , кА | Диапазон линейных напряжений стороны НН, $U_{НН}$ , В | Диапазон линейных токов стороны НН $I_{Л}$ , кА |
|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 6                                  | 7                                     | 8                                    | 9                                                     | 10                                              |
| 35                                 | 545,0                                 | 22,3—28,9                            | 492—380—218                                           | 38,6—50,0—50,0                                  |
| 35                                 | 825,7                                 | 33,4—40,8                            | 500—408—100                                           | 57,8—70,6                                       |
| 35                                 | 825,7                                 | 33,4—40,5                            | 500—412—126                                           | 57,8—70,8                                       |
| 35                                 | 825,7                                 | 33,4                                 | 500—120                                               | 57,8                                            |
| 110                                | 420                                   | 41,1—53,5                            | 649—499—149                                           | 71, 92,5                                        |

## металлургии

|    |         |       |           |       |
|----|---------|-------|-----------|-------|
| 10 | 520—189 | 9,45  | 317,5—115 | 16,35 |
| 35 | 330—117 | 16,42 | 407—144   | 28,4  |

## доменные печи

|      |             |                |                 |                |
|------|-------------|----------------|-----------------|----------------|
| 10,5 | 718         | 4,02           | 110             | 6,95           |
| 10   | 92,4—65,3   | 3,56           | 150—106         | 6,15           |
| 10,5 | 1045        | 4,02           | 158             | 6,95           |
| 10   | 248—196     | 4,88—7,75      | 308—154         | 8,45—13,4      |
| 6    | 530—352     | 6,87           | 267—178         | 11,9           |
| 6    | 635—485     | 7,72           | 286—218         | 13,35          |
| 10,5 | 577—528     | 15,4—21,0      | 228—152         | 26,5—36,5      |
| 10,5 | 950—950—780 | 21,6—27,7—27,7 | 255—198,5—162,5 | 37,4—47,8—47,8 |

| холостого хода в короткого замыкания  |                                   |                                           | Габариты (длина, высота, ширина), мм |
|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|
| потери холостого хода, $P_{ХХ}$ , кВт | напряжение короткого замыкания, % | потери короткого замыкания $P_{КЗ}$ , кВт |                                      |
| 15                                    | 16                                | 17                                        | 18                                   |

## новые печи

|           |            |             |                |
|-----------|------------|-------------|----------------|
| —         | —          | —           | 2000×3000×900  |
| 27,3—6,0  | 4,95—18,50 | 46,3—92,8   | 5150×4360×3910 |
| 15,2—37,5 | 16,10—9,50 | 140,6—159,3 | 4650×4275×2170 |
| —         | 8,30       | 152,0       | —              |
| 29,4      | —          | —           | 2350×3825×2670 |
| —         | —          | —           | —              |
| —         | 9,85—12,63 | 205,0       | 4650×4275×2170 |
| 27,4      | 10,80      | 322,0       | 4690×4500×3240 |

| Номер печной<br>установки (по<br>табл. 3.1) | Число<br>ступеней<br>напряже-<br>ния | Регулировка ступеней<br>напряжения | Напряжение<br>ступеней, В | Потери                             |  |
|---------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|--|
|                                             |                                      |                                    |                           | ток холостого<br>хода $I_{xx}$ , % |  |
| 1                                           | 11                                   | 12                                 | 13                        | 14                                 |  |
| 10—15                                       | 17                                   | РПН                                | 204,0—158,5               | 3,65—0,93                          |  |
| 16, 17                                      | 5                                    | Без нагрузки                       | 197,0—183,0               | 1,14                               |  |
| 18                                          | 17                                   | РПН                                | 204,0—161,5               | 3,12—7,6                           |  |
| 19                                          | 9                                    | РПН                                | 210,5—165—<br>136,0       | 21,8—<br>12,45—8,9                 |  |
| 20                                          | 23                                   | РПН                                | 230,4—140                 | —                                  |  |
| 21                                          | 17                                   | РПН                                | 238,5—181—<br>137         | —                                  |  |
| 22                                          | 23                                   | РПН                                | 287,4—147,4               | 0,95—0,69                          |  |
| 23                                          | 23                                   | РПН                                | 238,5—181—<br>137         | 3,7                                |  |
| 24                                          | 33                                   | РПН                                | 340                       | 0,34                               |  |
| 25                                          | 27                                   | РПН                                | 325                       | 3,0                                |  |
| 26                                          | 27                                   | РПН                                | 260                       | 3,0                                |  |

*Карбид*

|      |    |              |             |           |  |
|------|----|--------------|-------------|-----------|--|
| 1    | 1  | Без нагрузки | 94,0        | 1,55      |  |
| 2    | 5  | То же        | 121,0       | —         |  |
| 3    | 5  | »            | 149,0       | —         |  |
| 4    | 9  | »            | 153,0—127,0 | —         |  |
| 5    | 48 | РПН          | 260—130,0   | —         |  |
| 6    | 49 | РПН          | 262,5—130,8 | 1,68—0,15 |  |
| 7, 8 | 27 | РПН          | 290,0—130,0 | —         |  |

*Фосфор*

|      |    |              |             |           |  |
|------|----|--------------|-------------|-----------|--|
| 1    | 8  | Без нагрузки | 316—211     | 1,45—0,30 |  |
| 2    |    | То же        | 307—91,5    | 4,83—0,88 |  |
| 3    | 23 | РПН          | 492—218     | 8,6—4,4   |  |
| 4    | 23 | РПН          | 500—409—100 | 1,4       |  |
| 4, а | 19 | РПН          | 500—412—126 | 2,8       |  |
| 5    | 21 | РПН          | 500—120     | —         |  |
| 6    | 43 | РПН          | 649—490—149 | 0,7       |  |

*Печи цветной*

|   |    |  |           |                 |  |
|---|----|--|-----------|-----------------|--|
| 1 | 8  |  | 317,5—115 | 3,9—0,31        |  |
| 2 | 22 |  | 407—144   | 0,52—<br>0,0017 |  |

| холостого хода и короткого замыкания                                                    |                                                                                                              |                                                                                                                       | Габариты (длина, высота, ширина), мм                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| потери холостого хода, $P_{хх}$ , кВт                                                   | напряжение короткого замыкания, %                                                                            | потери короткого замыкания $P_{кз}$ , кВт                                                                             |                                                                                                                                                                          |
| 15                                                                                      | 16                                                                                                           | 17                                                                                                                    | 18                                                                                                                                                                       |
| 19,4—9,3<br>20,6<br>22,0—12,0<br>—<br>15,0<br>—<br>12,5<br>32,2<br>37,6<br>60,0<br>45,0 | 5,0—8,6<br>4,9—4,95<br>6,26—10,1<br>12,8<br>8,0<br>—<br>14,74<br>12,0—<br>18,8—37,7<br>11,45<br>11,5<br>14,0 | 57,9—74,4<br>275,0—255,0<br>74,5—114,5<br>117,2—<br>125—85,5<br>130<br>—<br>190,8—304,3<br>250<br>384,2<br>380<br>340 | 2370×4675×2090<br>—<br>2370×4675×2090<br>2370×4675×2090<br>3760×4500×2640<br>—<br>5980×7000×3095<br>6225×7680×3925<br>6500×7500×4500<br>6100×7950×5120<br>6921×7428×5300 |
| <i>ные печи</i>                                                                         |                                                                                                              |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                          |
| 5,3<br>—<br>28,5—19,5<br>47,6—<br>40,8—27,2<br>88,5—18,2<br>78,0                        | 6,6<br>3,55—2,88<br>10,5<br>3,94—<br>4,7—5,2<br>6,3—12,6<br>4,15—8,3<br>7,0—9,4—<br>17,0                     | 29,3<br>94,5<br>189,0<br>195,5—<br>233,6—211,5<br>615,0<br>333,2<br>625,0                                             | 2700×3300×1300<br>2600×3950×1800<br>3950×2850×1860<br>3690×3355×1260<br>—<br>6300×5980×3255<br>7840×3520×6270                                                            |
| <i>ные печи</i>                                                                         |                                                                                                              |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                          |
| 29,0—12,2<br>55,5—21,6<br>55,0—22,3<br>35,0<br>30,0<br>24,6<br>40                       | 9,5—16,3<br>9,1—7,0<br>4,1—13,9<br>4,6<br>8,9<br>4,8<br>7,4                                                  | 130,2—118,6<br>135,3—124,4<br>62,9—146,5<br>80<br>85<br>79,5<br>225                                                   | 3730×3100×2000<br>—<br>—<br>4700×4165×2925<br>5168×5385×3240<br>4160×4700×2900<br>7671×6441×3176                                                                         |
| <i>металлургии</i>                                                                      |                                                                                                              |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                          |
| 30,1—42,7<br>27,7—3                                                                     | 14,0—20<br>9,9—32,9                                                                                          | 101—84<br>142—132,3                                                                                                   | —<br>—                                                                                                                                                                   |



| Номер печи<br>установки (по<br>табл. 3.1) | Число<br>ступеней<br>напряже-<br>ния | Регулировка ступеней<br>напряжения | Напряжение<br>ступеней, В | Потери                             |  |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|--|
|                                           |                                      |                                    |                           | ток холостого<br>хода $I_{xx}$ , % |  |
| 1                                         | 11                                   | 12                                 | 13                        | 14                                 |  |

*Электрокорун*

|   |    |              |             |           |  |
|---|----|--------------|-------------|-----------|--|
| 1 | 1  | Без нагрузки | 110         | —         |  |
| 2 | 9  | То же        | 150—106     | —         |  |
| 3 | 1  | »            | 158         | —         |  |
| 4 | 5  | »            | 308—154     | 5,0—0,25  |  |
| 5 | 5  | »            | 267—178     | —         |  |
| 6 | 5  | »            | 286—218     | —         |  |
| 7 | 5  | »            | 228—152     | 2,5—0,4   |  |
| 8 | 17 | »            | 255—        | 1,32—0,12 |  |
|   |    |              | 198,5—162,5 |           |  |

\* Трансформаторы, выпускаемые по номенклатуре изделий завода-изгото

демонтирована. Печь РКЗ-72ф и РКЗ-80ф имеют одинаковые габариты и отличаются предельной мощностью. Печь РКЗ-72ф работает на кусковом термически неподготовленном сырье, а печь РКЗ-80ф — на агломерате, получаемом из мелочи фосфорита.

В группе печей по производству белого электрокорунда и силикоалюминия приведены данные наиболее мощных агрегатов.

Представленные в табл. 3.1 печи для производства медно-никелевого штейна имеют прямоугольные ванны, удельные мощности которых значительно превышают значения, предусмотренные в проектных заданиях. Печи по выплавке титанистых шлаков и печи РКО-7,9Ц (ОКБ-892) по своей конструкции близки к сталеплавильным печам и имеют варианты открытого и закрытого исполнения. Печи для производства свинца и цинка имеют круглые ванны.

Рассмотренные в табл. 3.1 печные агрегаты оснащены трансформаторами, электрические характеристики которых приведены в табл. 3.2.

В случае наличия у трансформатора диапазона постоянной мощности первые две цифры линейных напряжений стороны низшего напряжения (НН) соответствуют этому диапазону, а третья цифра равна низшему напряжению диапазона падающей мощности. В диапазоне

| холостого хода и короткого замыкания  |                                   |                                           | Габариты (длина, высота, ширина), мм |
|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|
| потери холостого хода, $P_{xx}$ , кВт | напряжение короткого замыкания, % | потери короткого замыкания $P_{kз}$ , кВт |                                      |
| 15                                    | 16                                | 17                                        | 18                                   |

*новые печи*

|           |           |           |                                  |
|-----------|-----------|-----------|----------------------------------|
| —         | 6,6       | 50        | 5340×4650×2880<br>2370×4675×2090 |
| 7,12      | 5,43      | 35,0      |                                  |
| —         | 6,6       | 50        |                                  |
| 20,9—5,0  | 4,9—18,0  | 45,4—89,1 |                                  |
| —         | 4,9—8,0   | 82,6—72,6 |                                  |
| 18,2—11,5 | 7,05—9,68 | 75,6—68,6 |                                  |
| 26,8—11,7 | 6,65—13,7 | 85—149    |                                  |
| 10,9—3,8  | 4,6—10,6  | 48,3—67,7 |                                  |
|           |           |           |                                  |
|           |           |           |                                  |

введена 1984—1986 гг.

постоянной мощности, по мере изменения номинального напряжения стороны НН, происходит изменение величины тока, а в падающем диапазоне мощностей по мере уменьшения напряжения стороны НН происходит соответствующее уменьшение мощности. Токи стороны НН этих трансформаторов приведены соответственно указанным выше ступеням линейных напряжений. Потери холостого хода и короткого замыкания даются для характерных ступеней, приведенных в соответствующем столбце таблицы. Все отечественные трансформаторы изготовлены на Московском электрозаводе им. Куйбышева (МЭЗ), который в различные периоды времени имел разные наименования, в связи с чем в паспортных данных встречаются разные обозначения. Многие из этих трансформаторов были реконструированы организацией «Электропромремонт» (г. Москва) со значительным увеличением их мощности. В обозначении типов этих трансформаторов введена буква «Р» (реконструирован).

Старые печи оборудованы переключателями ступеней напряжения без возбуждения (условное обозначение БПВ), которые для изменения рабочей ступени требуют отключения трансформаторов от сети. Современные мощные электропечные трансформаторы имеют регуляторы переключения ступеней напряжения (РПН),

которые позволяют изменять рабочие ступени под нагрузкой. Как правило, все рассматриваемые электропечные агрегаты оборудованы системами масляно-водяного охлаждения с принудительной циркуляцией масла. Только трансформаторный агрегат печи РКЗ-80/у ЭОДЦНК-83300/220 имеет системы принудительной циркуляции масла с установками воздушного охлаждения, оборудованными специальными вентиляторами.

Трансформаторные агрегаты РПЗ-63, РКЗ-80,0/у и РПЗ-80,0/у предусматривают включение конденсаторной батареи УПК в промежуточные цепи регулирования напряжения, а печи РКЗ-16,5/у для этой цели оборудуются специальными разделительными трансформаторами типа ОС-1000/10 с напряжением стороны ВН 6 кВ и стороны НН 40 В. Трансформатор печи РКЗ-81,0/УП оснащен специальной обмоткой для подключения установки поперечной компенсации. Вопросы, связанные с применением конденсаторных батарей для улучшения электрических характеристик печей, рассмотрены в главе VIII.

### 3. Основные конструктивные данные коротких сетей руднотермических печей

Конструктивное выполнение коротких сетей действующих печей определяется типом печной установки и габаритными размерами их ванн. В табл. 3.3 приведены основные конструктивные данные коротких сетей печных установок, рассмотренных в табл. 3.1, за исключением некоторых печей цветной металлургии, которые частично рассмотрены в табл. 3.8.

Конфигурации коротких сетей действующих печей соответствуют рис. I.2—I.13, рассмотренных в гл. I.

Конструктивные данные шинного пакета включают:

а) сечение полюс-фазы, при обозначении сечения в скобках указываются либо высота и толщина прямоугольной шины, либо внешний диаметр и толщина трубчатого проводника; перед скобками указывается число проводников, проводящих ток в одном направлении. Кроме того, приводится расстояние между осями проводников в горизонтальной плоскости ( $t$ ) и расстояние между осями трубошин в вертикальной плоскости ( $\alpha t$ );

б) длину фаз шинного пакета, которая указывается по проектным данным. Следует иметь в виду, что в ряде случаев при монтаже печей и их реконструкциях эта величина могла иметь изменения в пределах 0,5—1,0 м.

Длина фазы включает в себя общую протяженность пакета в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также расширяющую часть.

Конструктивные данные пакета гибких проводников содержат:

а) сечение полюс-фазы. При обозначении сечения пакетов гибких лент в круглых скобках указаны ширина и толщина ленты, в квадратных скобках дано число лент в пакете, а перед скобками число пакетов, проводящих ток в одном направлении. При обозначении сечения пакетов гибких кабелей в круглых скобках дано число кабелей и их сечение (500 или 1000 мм<sup>2</sup>), а перед скобками указывается число пакетов;

б) длину гибких проводников ( $l$ ). Эта величина представляет собой сумму длин непосредственно гибких проводников (прямолинейные, а также сопряженные с ними криволинейные участки), и контактных башмаков, в которые они заделываются;

в) расстояние по прямой между концами подвижного и неподвижного башмака (хорда  $d_r$ ). Исполнение вторичного токоподвода импортной печи РКЗ-81,0/УП, изображенной на рис. 1.7 существенно отличаются от исполнения аналогичных узлов ферросплавных печей отечественного производства. Печь имеет верхний токоподвод с максимальным приближением трубошин к электродам и гибкую часть, выгнутую кверху. Трубошины электрододержателя имеют небольшую длину 900 мм и расположены параллельно оси электрода по окружности вокруг него. Наиболее своеобразно выполнена гибкая часть токопровода. Гибкие ленты прикреплены к трубошинам электрододержателя таким образом, что большая часть гибких лент пакетов располагается параллельно оси электрода, не касаясь мантии, а оставшаяся часть гибких пакетов, делая небольшую петлю внутрь, крепится к трубошине пакета. Каждая пара труб пакетов и соответственно пара гибких пакетов, а также пара трубошин электрододержателей подсоединены к одной контактной плите.

Печи с верхним токоподводом № 16 и с глубоким боковым вводом № 17 и 21 впервые были применены на Кузнецком заводе ферросплавов.

В первом случае реконструкция короткой сети сочетается с понижением отметки зонта, наличием бортовых газоотсосов, гидравлических уплотнений мантией в крышке зонта. Неподвижный шинный пакет короткой се-

| № печной<br>установки | Тип печной установки | Номер рисунка | Штучный                                  |  |
|-----------------------|----------------------|---------------|------------------------------------------|--|
|                       |                      |               | количество, сечение<br>на полюс-фазу, мм |  |
| 1                     | 2                    | 3             | 4                                        |  |

## Ферросплав

|    |             |                |              |
|----|-------------|----------------|--------------|
| 1  | РКО-4,5     | 1.2 а, 1.13 а  | 4 (100×10)   |
| 2  | РКО-9,0     | 1.3 а, 1.13 а  | 4 (300×12)   |
| 3  | РКО-10,5    | 1.3 а, 1.13 а  | 4 (250×12)   |
| 4  | РКО-10,5    | 1.3 а, 1.13 а  | 4 (250×12)   |
| 5  | РПО-11,0    | 1.8 а, 1.13 а  | 8 (Ø 50×10)  |
| 6  | РКО-11,5    | 1.2 б, 1.13 а  | 4 (Ø 50×10)  |
| 7  | РКО-14,0    | 1.3 а, 1.13 а  | 6 (200×10)   |
| 8  | РКО-14,3    | 1.3 б, 1.13 а  | 4 (400×12)   |
| 9  | РКО-15,0    | 1.3 а, 1.13 а  | 9 (300×12)   |
| 10 | РКО-16,5    | 1.3 б, 1.13 а  | 6 (300×12)   |
| 11 | РКО-16,5    | 1.3 б, 1.13 а  | 6 (300×12)   |
| 12 | РКО-16,5    | 1.3 б, 1.13 а  | 6 (300×12)   |
| 13 | РКЗ-16,5    | 1.4 а, 1.13 б  | 6 (300×12)   |
| 14 | РКО-16,5    | 1.4 а, 1.13 б  | 6 (300×12)   |
| 15 | РКО-16,5/у  | 1.4 а, 1.13 б  | 6 (300×12)   |
| 16 | РКО-20,0    | 1.4 а, 1.13 а  | 6 (300×30)*  |
| 17 | РКО-20,0    | 1.4 а, 1.13 б  | 6 (300×30)*  |
| 18 | РКЗ-21,0    | 1.4 а, 1.13 б  | 6 (400×12)   |
| 19 | РКЗ-22,5    | 1.4 а, 1.13 б  | 6 (400×12)   |
| 20 | РКЗ-27,5    | 1.4 а, 1.13 б  | 6 (400×12)   |
| 21 | РКО-29,0    | 1.4 а, 1.13 б  | 6 (500×29)*  |
| 22 | РКЗ-40,0/у  | 1.4 а, 1.13 б  | 10 (60×10)   |
| 23 | РПЗ-63,0/у  | 1.11 а, 1.11 б | 16 (Ø 60×10) |
| 24 | РКЗ-75,0/уп | 1.7 а, 1.7 б   | 12 (Ø 75×10) |
| 25 | РКЗ-80/у    | 1.4 а, 1.13 б  | 16 (Ø 60×10) |
| 26 | РПЗ-80/у    | 1.11 а, 1.11 б | 20 (Ø 80×10) |

## Карбид

|    |              |               |              |
|----|--------------|---------------|--------------|
| 1  | РПО-3,0 к    | 1.8 б, 1.13 а | 6 (100×10)   |
| 2  | РПО-7,5 к    | 1.8 в, 1.13 а | 8 (220×12)   |
| 3  | РПО-10,0 к   | 1.8 а, 1.13 а | 8 (Ø 50×10)  |
| 4  | РПО-15,0 к   | 1.8 а, 1.13 а | 8 (Ø 50×10)  |
| 5  | РПО-40,0 к   | 1.9 а, в      | 20 (Ø 50×10) |
| 6  | РПО-40,0 к   | 1.9 б, в      | 12 (Ø 50×10) |
| 7  | РПО-60,0 к   | 1.9 а, в      | 20 (Ø 50×10) |
| 8  | РПП-60,0 р/к | 1.9 а, б      | 28 (Ø 50×10) |
| 9  | РПЗ-80,0 к/у | 1.9 а, в      | 32 (Ø 60×10) |
| 10 | РКЗ-80,0 к/у | 1.4 а, 1.13 б | 16 (Ø 60×10) |

## Фосфор

|   |            |               |            |
|---|------------|---------------|------------|
| 1 | РКЗ-10,5 ф | 1.4 б, 1.13 в | 2 (300×10) |
| 2 | РКЗ-13,8 ф | 1.4 б, 1.13 в | 4 (250×10) |
| 3 | РКЗ-33,0 ф | 1.5 а, 1.13 а | 6 (300×12) |

# СЕТЕЙ РУДНОТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

| пакет         |      |       |   |    |
|---------------|------|-------|---|----|
| длина фаз, мм |      |       |   |    |
| I I           | I II | I III | t | αt |
| 5             | 6    | 7     | 8 | 9  |

## ные печи

|       |       |       |     |     |
|-------|-------|-------|-----|-----|
| 5500  | 4600  | 5500  | 35  | —   |
| 17500 | 9500  | 9100  | 27  | —   |
| 14500 | 6800  | 6600  | 27  | —   |
| 14500 | 6800  | 6600  | 27  | —   |
| 5000  | 4300  | 5000  | 110 | 135 |
| 14000 | 21000 | 21000 | 80  | 60  |
| 14700 | 7000  | 6800  | 25  | —   |
| 15000 | 5000  | 15000 | 27  | —   |
| 2300  | 10000 | 9000  | 27  | —   |
| 14300 | 4600  | 14300 | 27  | —   |
| 14300 | 4600  | 14300 | 27  | —   |
| 14300 | 4600  | 14300 | 27  | —   |
| 12200 | 5400  | 12200 | 27  | —   |
| 12200 | 5400  | 12200 | 27  | —   |
| 12200 | 5400  | 12200 | 27  | —   |
| 18100 | 12400 | 12000 | 45  | —   |
| 22700 | 12550 | 11500 | 45  | —   |
| 12200 | 5400  | 12200 | 27  | —   |
| 12200 | 5400  | 12200 | 27  | —   |
| 12200 | 5400  | 12200 | 32  | —   |
| 23700 | 13500 | 12500 | 44  | —   |
| —     | —     | —     | —   | —   |
| 12400 | 12400 | 12400 | 85  | 85  |
| 16200 | 9000  | 16200 | 110 | 95  |
| 22040 | 10780 | 22040 | 80  | 80  |
| 18600 | 18200 | 18600 | 100 | 105 |

## ные печи

|       |       |       |     |      |
|-------|-------|-------|-----|------|
| 5100  | 5100  | 5100  | 100 | —    |
| 9700  | 7500  | 9700  | 27  | —    |
| 7800  | 5400  | 7800  | 70  | 70   |
| 7800  | 5400  | 7800  | 70  | 70   |
| 12400 | 10000 | 7600  | 110 | 37,5 |
| 12100 | 10900 | 13300 | 220 | »    |
| 12400 | 10000 | 7600  | 110 | »    |
| 13200 | 10400 | 7600  | 110 | »    |
| —     | —     | —     | —   | —    |
| 20500 | 10500 | 20500 | 120 | 47,5 |

## ные печи

|       |      |       |    |   |
|-------|------|-------|----|---|
| 13100 | 5100 | 10400 | 25 | — |
| 16300 | 7300 | 9400  | 25 | — |
| 5300  | 5300 | 4300  | 27 | — |

| № печной установки | Тип печной установки | Номер рисунка | Шинный                                |  |
|--------------------|----------------------|---------------|---------------------------------------|--|
|                    |                      |               | количество, сечение на полюс-фазу, мм |  |
| 1                  | 2                    | 3             | 4                                     |  |

|   |                   |             |               |  |
|---|-------------------|-------------|---------------|--|
| 4 | РКЗ-48,0 ф        | 1.5а, 1.13а | 8 (Ø 60×10)   |  |
| 5 | РКЗ-50,0 ф        | 1.5б, 1.13в | 6 (Ø 60×10)   |  |
| 6 | РКЗ-72,0 ф (80,0) | 1.5а, 1.13а | 8 (Ø 60×12,5) |  |

#### Электрокорун

|   |             |              |             |  |
|---|-------------|--------------|-------------|--|
| 1 | РКО-1,3 эк  | 1.14а, 1.13а | 2 (200×10)  |  |
| 2 | РКЗ-1,6 эк  | 1.14а, 1.13б | 2 (200×10)  |  |
| 3 | РКО-1,9 эк  | 1.14а, 1.13а | 2 (200×10)  |  |
| 4 | РКЗ-4,5 эк  | 1.14а, 1.13б | 2 (250×10)  |  |
| 5 | РКЗ-5,5 эк  | 1.6а, 1.13б  | 2 (300×12)  |  |
| 6 | РКЗ-6,6 эк  | 1.6а, 1.13б  | 2 (300×12)  |  |
| 7 | РКО-10,5 эк | 1.3а, 1.13а  | 4 (250×12)  |  |
| 8 | РКО-16,5 эк | 1.3б, 1.13а  | 6 (Ø 50×10) |  |

#### Печи цветной

|   |           |        |            |  |
|---|-----------|--------|------------|--|
| 1 | РКО-7,9 ц | 1.14 а | 2 (300×10) |  |
| 2 | РПЗ-20 ц  | 1.14 а | 3 (300×12) |  |

| № печной установки | Пакеты гибких проводников           |             | Трубки                    |                                                 |
|--------------------|-------------------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------------------------------|
|                    | количество, сечение, полюс фазы, мм | длина l, мм | хорда d <sub>г</sub> , мм | количество на полюс-фазу, диаметр и толщина, мм |
| 1                  | 10                                  | 11          | 12                        | 13                                              |

#### Ферросплав

|    |                 |      |      |              |
|----|-----------------|------|------|--------------|
| 1  | 4/16 (100×1)    | 3400 | 1000 | 2 (Ø 60×10)  |
| 2  | 8 (4×500)       | 2150 | 1500 | 4 (Ø 60×15)  |
| 3  | 8 (4×500)       | 2200 | 1500 | 4 (Ø 60×10)  |
| 4  | 8 (4×500)       | 2200 | 1500 | 4 (Ø 50×10)  |
| 5  | 10/30 (100×1,5) | 2150 | 1600 | 12 (Ø 50×10) |
| 6  | 12/30 (120×1,5) | 2100 | 1500 | 8 (Ø 60×15)  |
| 7  | 12/16 (100×1,0) | 2100 | 1500 | 4 (Ø 60×10)  |
| 8  | 12 (4×500)      | 2150 | 1600 | 4 (Ø 60×15)  |
| 9  | 8 (4×1000)      | 2100 | 1600 | 4 (Ø 60×15)  |
| 10 | 8 (4×1000)      | 2150 | 1600 | 4 (Ø 80×10)  |
| 11 | 8 (5×500)       | 2150 | 1600 | 4 (Ø 60×15)  |
| 12 | 8 (4×1000)      | 2150 | 1600 | 4 (Ø 60×15)  |
| 13 | 12 (4×500)      | 2150 | 1600 | 4 (Ø 60×15)  |
| 14 | 12 (4×500)      | 2150 | 1600 | 4 (Ø 60×10)  |
| 15 | 12 (4×500)      | 2150 | 1600 | 4 (Ø 60×10)  |
| 16 | 8/40 (100×1)    | 2050 | 1490 | 8 (Ø 60×15)  |

| пакет              |             |              |          |            |
|--------------------|-------------|--------------|----------|------------|
| длина фаз, мм      |             |              |          |            |
| <i>l</i> I         | <i>l</i> II | <i>l</i> III | <i>t</i> | $\alpha t$ |
| 5                  | 6           | 7            | 8        | 9          |
| 4600               | 4500        | 4600         | 80       | 80         |
| 4000               | 4000        | 4000         | 90       | 70         |
| 4750               | 4600        | 4750         | 80       | 80         |
| <i>довые печи</i>  |             |              |          |            |
| 3500               | 3200        | 3200         | 100      | —          |
| 3900               | 3050        | 3650         | 100      | —          |
| 3500               | 3200        | 3200         | 100      | —          |
| 4700               | 3500        | 4700         | 27       | —          |
| 3400               | 3300        | 3300         | 30       | —          |
| 3400               | 3300        | 3300         | 30       | —          |
| 14500              | 6800        | 6600         | 27       | —          |
| 12500              | 5500        | 12500        | 110      | 37,5       |
| <i>металлургии</i> |             |              |          |            |
| 4580               | 3100        | 4580         | 30       | —          |
| 3410               | 3480        | 3510         | 20       | —          |

Продолжение табл. 3.3

| электрододержателя |               | Контактные плиты                             |             | Диаметр электрода, мм |
|--------------------|---------------|----------------------------------------------|-------------|-----------------------|
| <i>k</i> , мм      | <i>b</i> , мм | количество на полюс-фазу и размеры плиты, мм | толщина, мм |                       |
| 14                 | 15            | 16                                           | 17          | 18                    |
| <i>ные печи</i>    |               |                                              |             |                       |
| 1000               | 6000          | 2 (720×200)                                  | 45          | 450                   |
| 1650               | 2700          | 4 (1000×340)                                 | 80          | 950                   |
| 1650               | 2700          | 4 (1000×380)                                 | 60          | 900                   |
| 1650               | 2700          | 4 (1000×400)                                 | 60          | 1000                  |
| 1400               | 2600          | 12 (900×250)                                 | 60          | 1100                  |
| 1500               | 2500          | 8 (1000×340)                                 | 80          | 950                   |
| 1850               | 3000          | 4 (1000×400)                                 | 80          | 1100                  |
| 1800               | 2700          | 4 (1000×400)                                 | 80          | 950                   |
| 1500               | 2600          | 4 (1000×375)                                 | 80          | 1050                  |
| 2100               | 3400          | 4 (1300×400)                                 | 80          | 1200                  |
| 2100               | 3100          | 4 (1250×400)                                 | 80          | 1200                  |
| 2100               | 3000          | 4 (1250×400)                                 | 80          | »                     |
| 1650               | 2300          | 4 (1100×400)                                 | 80          | »                     |
| 1650               | 2300          | 4 (1100×400)                                 | 80          | »                     |
| 1650               | 2300          | 4 (1100×400)                                 | 80          | »                     |
| 3665               | 750           | 4 (1000×408)                                 | 60          | 1100                  |



| № печной<br>установки | Пакеты гибких проводников              |                   | Трубки              |                                                        |
|-----------------------|----------------------------------------|-------------------|---------------------|--------------------------------------------------------|
|                       | количество, сечение,<br>полюс фазы, мм | длина $l$ ,<br>мм | хорда $d_p$ ,<br>мм | количество на полюс-<br>фазу, диаметр и<br>толщина, мм |
| 1                     | 10                                     | 11                | 12                  | 13                                                     |
| 17                    | 8/40 (100×1)                           | 2480              | 1690                | 4 (Ø 60×15)                                            |
| 18                    | 16 (4×500)                             | 2150              | 1600                | 4 (Ø 60×15)                                            |
| 19                    | 10 (4×1000)                            |                   |                     | 4 (Ø 80×15)                                            |
| 20                    | 12 (4×1000)                            | 2150              | 1600                | 10 (Ø 60×15)                                           |
| 21                    | 10/48 (100×1)                          | 2100              | 1600                | 10 (Ø 60×10)                                           |
| 22                    | 16 (4×1000)                            | —                 | —                   | 10 (Ø 60×10)                                           |
| 23                    | 44 (4×500)                             | 2200              | 1400                | 16 (Ø 60×10)                                           |
| 24                    | 12/24 (1×220)                          | 3300              | 320                 | 12 (○ 75×10)                                           |
| 25                    | 64 (15×100×1)                          | 2000              | 1360                | 12 (○ 60×10)                                           |
| 26                    | 40 (15×100×1)                          | 225               | 125                 | 20 (Ø 60×10)                                           |

#### Карбид

|    |                  |      |      |              |
|----|------------------|------|------|--------------|
| 1  | 4/20 (100×1,0)/  | 2600 | 1150 | 6 (Ø 80×7,5) |
| 2  | 8/32 (100×1,5)/  | 1800 | 1200 | 8 (Ø 50×10)  |
| 3  | 8/35 (100×1,5)/  | 2000 | 1000 | 8 (Ø 50×10)  |
| 4  | 8/35 (100×1,5)   | 2000 | 1000 | 8 (Ø 50×10)  |
| 5  | 20/14 (140×1,5)/ | 1500 | 900  | 20 (Ø 50×10) |
| 6  | 24/12 (120×1,5)/ | 1800 | 1000 | 8 (Ø 50×10)  |
| 7  | 20/14 (140×1,5)  | 1800 | 1000 | 16 (Ø 60×10) |
| 8  | 28/14 (140×1,5)  | 2300 | 1000 | 16 (○ 60×10) |
| 9  | 8 (6×10000)      | —    | —    | 32 (○ 60×10) |
| 10 | 64 (15×100×1)    | 2500 | 1700 | 32 (○ 60×10) |

#### Фосфор

|   |                  |      |      |              |
|---|------------------|------|------|--------------|
| 1 | 4/30 (150×0,5)/  | 2600 | 1400 | 12 (Ø 50×10) |
| 2 | 4/14 (210×1,0)   | 2600 | 1750 | 24 (Ø 50×10) |
| 3 | 4/22 (250×1,0)/  | 2460 | 1800 | 24 (Ø 50×10) |
| 4 | 24/32 (100×0,5)/ | 2520 | 1700 | 24 (Ø 50×10) |
| 5 | 32/15 (90×1)/    | 2150 | 1250 | 20 (Ø 50×10) |
| 6 | 32/15 (100×1)    | 2600 | 1750 | 24 (○ 50×10) |

#### Электрокорун

|   |                 |      |      |             |
|---|-----------------|------|------|-------------|
| 1 | 4/30 (100×0,5)  | 3500 | 1500 | 5 (Ø 30×10) |
| 2 | 2 (6×500)       | 4150 | 1000 | 2 (Ø 50×10) |
| 3 | 4/30 (100×0,5)/ | 3500 | 1500 | 5 (Ø 30×10) |
| 4 | 2 (6×500)       | 4150 | 1000 | 4 (Ø 50×10) |
| 5 | 1 (9×500)       | 4120 | 1500 | 6 (Ø 60×10) |
| 6 | 1 (9×500)       | 3250 | 1500 | 2 (Ø 60×10) |
| 7 | 8 (4×500)       | 2200 | 1200 | 4 (Ø 50×10) |
| 8 | 8 (4×500)       | 2100 | 1500 | 4 (Ø 50×10) |

#### Печи цветной

|   |        |      |      |              |
|---|--------|------|------|--------------|
| 1 | 32×500 | 7800 | 800  | 2 (Ø 100×10) |
| 2 | 24×500 | 3670 | 1070 | 8 (Ø 60×10)  |

\* Алюминиевые шины.

\*\* Водохладящие кабели.

| электрододержателя |               | Контактные плиты                             |             | Диаметр электрода мм |
|--------------------|---------------|----------------------------------------------|-------------|----------------------|
| <i>a</i> , мм      | <i>b</i> , мм | количество на полюс-фазу и размеры плиты, мм | толщина, мм |                      |
| 14                 | 15            | 16                                           | 17          | 18                   |
| 2115               | 2100          | 4 (1000×408)                                 | 60          | 1100                 |
| 2300               | 2300          | 4 (1100×350)                                 | 80          | 1200                 |
| 1650               | 2200          | 4 (1250×400)                                 | 80          | »                    |
| 1650               | 2300          | 5 (1100×400)                                 | 80          | 1400                 |
| 2075               | 2440          | 5 (1000×400)                                 | 60          | 1400                 |
| —                  | —             | 10 (1150×400)                                | 85          | 1500                 |
| 1400               | 2400          | 8 (1100×400)                                 | 50          | 2800×650             |
| —                  | —             | 8 (1950×420)                                 | 110         | 2000                 |
| 2400               | 1200          | 12 (1250×450)                                | 85          | 1900                 |
| 1100               | 1850          | 10 (1500×400)                                | 110         | 2400×1200            |

*ные печи*

|      |      |               |    |          |
|------|------|---------------|----|----------|
| 1200 | 900  | 6 (900×240)   | 50 | 600      |
| 1200 | 1100 | 8 (900×250)   | 50 | 955      |
| 1200 | 1100 | 8 (900×250)   | 50 | 1100     |
| 1200 | 1100 | 8 (900×250)   | 50 | 1100     |
| 1300 | 1000 | 10 (950×380)  | 50 | 2800×650 |
| 1300 | 800  | 4 (2000×400)  | 80 | 2800×650 |
| 1300 | 800  | 8 (2000×400)  | 80 | 2800×650 |
| 1300 | 800  | 8 (2000×400)  | 80 | 3200×800 |
| —    | —    | 16 (1950×400) | 85 | 3200×800 |
| 2000 | —    | 16 (2000×300) | 80 | 1700     |

*ные печи*

|      |   |               |    |      |
|------|---|---------------|----|------|
| 2400 | — | 6 (950×375)   | 40 | 800  |
| 2500 | — | 12 (1250×350) | 40 | 1450 |
| 2350 | — | 12 (1250×350) | 40 | 1400 |
| 2600 | — | 12 (1250×350) | 40 | 1400 |
| 2800 | — | 10 (1250×300) | 40 | 1350 |
| 2600 | — | 12 (1700×420) | 40 | 1700 |

*довые печи*

|      |      |              |    |      |
|------|------|--------------|----|------|
| 850  | 2100 | 5 (620×330)  | 40 | 500  |
| 550  | 2900 | 3 (500×400)  | 50 | 400  |
| 850  | 2100 | 5 (620×330)  | 40 | 500  |
| 500  | 3500 | 3 (500×400)  | 50 | 500  |
| 500  | 3500 | 3 (500×500)  | 60 | 500  |
| 500  | 3500 | 3 (500×700)  | 50 | 400  |
| 1600 | 3700 | 5 (1000×400) | 60 | 1050 |
| 1600 | 3700 | 4 (1250×400) | 80 | 1200 |

*металлургии*

|      |      |   |   |      |
|------|------|---|---|------|
| 3200 | 4000 | — | — | 450  |
| 3800 | —    | — | — | 1200 |

ЗНАЧЕНИЯ СРЕДНИХ ПЛОТНОСТЕЙ ТОКОВ ВТОРИЧНЫХ ТОКОПРОВОДОВ РУДНОТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

| № п/п<br>Новый<br>установка | Тип печной установки | Шинный пакет, А/мм² |                | Гибкие проводники, А/мм² |                | Трубки электродержателя, А/мм² |                | Электрод, А/см² |                | Контакт плита-электрод, А/см² |                |
|-----------------------------|----------------------|---------------------|----------------|--------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------------------|----------------|
|                             |                      | i <sub>н</sub>      | i <sub>р</sub> | i <sub>н</sub>           | i <sub>р</sub> | i <sub>н</sub>                 | i <sub>р</sub> | i <sub>н</sub>  | i <sub>р</sub> | i <sub>н</sub>                | i <sub>р</sub> |
| Ферросплавные печи          |                      |                     |                |                          |                |                                |                |                 |                |                               |                |
| 1                           | РКО-4,5              | 1,78                | 1,78           | 1,10                     | 1,10           | 2,24                           | 2,24           | 4,40            | 4,40           | 2,43                          | 2,43           |
| 2                           | РКО-9,0              | 1,86                | 1,56           | 1,68                     | 1,40           | 3,42                           | 2,86           | 6,55            | 5,46           | 1,97                          | 1,65           |
| 3                           | РКО-10,5             | 1,85                | 1,93           | 1,38                     | 1,45           | 4,42                           | 4,60           | 6,04            | 6,29           | 1,46                          | 1,52           |
| 4                           | РКО-10,5             | 1,85                | 1,85           | 1,38                     | 1,38           | 4,42                           | 4,42           | 4,89            | 4,89           | 1,39                          | 1,39           |
| 5                           | РПО-11,0             | 4,48                | 4,18           | 1,00                     | 0,94           | 2,98                           | 2,79           | 4,74            | 4,42           | 1,67                          | 1,56           |
| 6                           | РКО-11,5             | 4,78                | 4,48           | 0,96                     | 0,90           | 2,65                           | 2,48           | 5,87            | 5,50           | 1,30                          | 1,22           |
| 7                           | РКО-14,0             | 2,41                | 2,21           | 1,50                     | 1,38           | 4,60                           | 4,24           | 5,26            | 4,84           | 1,81                          | 1,66           |
| 8                           | РКО-14,3             | 1,54                | 1,51           | 1,23                     | 1,21           | 3,76                           | 3,71           | 7,20            | 7,10           | 1,84                          | 1,81           |
| 9                           | РКО-15,0             | 1,04                | 1,02           | 1,05                     | 1,03           | 4,28                           | 4,21           | 6,70            | 6,58           | 2,23                          | 2,20           |
| 10                          | РКО-16,5             | 1,60                | 1,69           | 1,09                     | 1,14           | 3,95                           | 4,14           | 5,31            | 5,58           | 1,66                          | 1,75           |
| 11                          | РКО-16,5             | 1,60                | 1,46           | 1,73                     | 1,58           | 4,42                           | 4,02           | 5,31            | 4,82           | 1,73                          | 1,57           |
| 12                          | РКО-16,5             | 1,60                | 1,69           | 1,09                     | 1,14           | 4,42                           | 4,66           | 5,31            | 5,58           | 1,73                          | 1,83           |
| 13                          | РКЗ-16,5             | 1,60                | 1,53           | 1,44                     | 1,37           | 4,42                           | 4,20           | 5,31            | 5,05           | 1,97                          | 1,87           |
| 14                          | РКЗ-16,5             | 1,60                | 1,43           | 1,44                     | 1,29           | 5,52                           | 4,91           | 5,31            | 4,72           | 1,97                          | 1,75           |
| 15                          | РКЗ-16,5/у           | 1,60                | 1,43           | 1,44                     | 1,29           | 5,52                           | 4,91           | 5,31            | 4,72           | 1,97                          | 1,75           |
| 16                          | РКО-20,0             | 0,59                | 0,63           | 1,0                      | 1,06           | 0,87                           | 2,0            | 5,86            | 6,16           | 1,70                          | 1,79           |
| 17                          | РКО-20,0             | 0,57                | 0,63           | 0,995                    | 1,06           | 3,60                           | 3,99           | 5,50            | 6,16           | 1,85                          | 2,06           |
| 18                          | РКЗ-21,0             | 1,50                | 1,38           | 1,35                     | 1,25           | 5,52                           | 5,08           | 6,63            | 6,10           | 2,81                          | 2,59           |
| 19                          | РКО-22,5             | 1,58                | 1,36           | 1,14                     | 0,98           | 3,70                           | 3,19           | 6,94            | 5,97           | 2,27                          | 1,95           |
| 20                          | РКЗ-27,5/у           |                     | 1,6            |                          | 0,96           | 2,18                           | 2,18           | 5,2             | 5,2            |                               | 2,1            |
| 21                          | РКО-29,0             | 0,46                | 0,52           | 0,86                     | 1,97           | 2,65                           | 2,96           | 4,67            | 5,23           | 1,76                          | 1,97           |
| 22                          | РКЗ-40,0/у           |                     | 4,0            |                          | 0,98           | 4,0                            | 4,0            | 6,16            | 6,16           |                               | 2,37           |
| 23                          | РПЗ-63,0/у           | 4,70                | 3,28           | 1,35                     | 0,94           | 4,70                           | 3,28           | 6,51            | 4,53           | 3,37                          | 2,34           |
| 24                          | РКЗ-81,0/у II        |                     | 3,49           |                          | 1,35           | 3,49                           | 3,49           |                 | 4,71           |                               | 2,25           |



ти, расположенный выше зонта, максимально приближен к электродам. Гибкая часть токопровода имеет ленты с минимальной длиной, выгнутые вверх, литые соединительные башмаки. Ленты вынесены из-под зонта, что снижает их рабочую температуру. Печи с глубоким боковым вводом шинопроводов имеют рационально выполненную расшивку, сниженную длину трубошин электрододержателя при одновременном увеличении длины параллельного участка на траверсах электрододержателя. ре в значительной степени затрудняло эту работу.

Проводники электрододержателя характеризуются:

а) сечением трубок. В скобках указаны их диаметры и толщина, а перед скобками их число. Для печей со схемой «звезда» и «треугольник на подвижных башмаках гибких проводников» указывается число трубок на один электрод, для печей со схемой соединения «треугольник на электродах» приводится число проводников, проводящих ток в одном направлении (на полюс-фазу).

Конфигурация трубок электрододержателя характеризуется в горизонтальной плоскости расстоянием подвижного башмака до центра электрода («в»), а в вертикальной плоскости — расстоянием от центра такого башмака до середины контактных плит («к»);

б) размерами плит, в связи с чем приводятся размеры контактной поверхности. В скобках указывается сечение плит, а перед скобками их число, соответствующее указанным в таблице трубкам электрододержателя. Кроме того, приведены толщины контактных плит.

В качестве материала проводников коротких сетей действующих печей применяется медь марки М-1, за исключением шинного пакета печи РКО-20 (№ 16, 17), для которой был использован алюминий марки А-1 [9]. Следует отметить, что короткие сети действующих печей не всегда имеют оптимальные конструктивные решения. Особенно это наблюдается для печей малой и средней мощности, для которых проблемы оптимизации электрического режима не стояли так остро.

Сечения элементов короткой сети характеризуются средними значениями плотностей тока, величины которых приведены в табл. 3.4.

Величины плотностей тока приведены для случая работы печей при номинальных токах трансформатора ( $I_n$ ), а также для средних рабочих токов печей соответ-

ствующих режиму максимальной потребляемой активной мощности\*.

Из этой таблицы видно, что средняя плотность тока в действующих печах составляла:

1. В шинном пакете: а) для прямоугольных сечений медных шин —  $1,2\text{--}2,4\text{ А/мм}^2$  (в среднем  $1,5\text{ А/мм}^2$ ), алюминиевых шин —  $0,60\text{--}0,75\text{ А/мм}^2$ ; б) водоохлаждаемых медных трубошин —  $2,8\text{--}4,5\text{ А/мм}^2$  (в среднем  $3,5\text{ А/мм}^2$ ).

2. В пакетах гибких проводников: а) для гибких медных лент —  $1,0\text{--}1,5\text{ А/мм}^2$  (в среднем  $1,1\text{ А/мм}^2$ ); б) для гибких кабелей —  $0,8\text{--}1,2\text{ А/мм}^2$  (в среднем  $0,9\text{ А/мм}^2$ ); в трубках электрододержателей —  $2,3\text{--}5,0\text{ А/мм}^2$  (в среднем  $4,0\text{ А/мм}^2$ ).

3. В контакте щека — электрод: а) ферросплавных и карбидных печей —  $1,40\text{--}2,70\text{ А/см}^2$  (в среднем  $2\text{ А/см}^2$ ); б) фосфорных и электрокорундовых печей —  $0,50\text{--}1,40\text{ А/см}^2$  (в среднем  $1,2\text{ А/см}^2$ ).

4. В электродах: а) ферросплавных и карбидных печей —  $4,0\text{--}7,2\text{ А/см}^2$ ; б) фосфорных печей —  $1,4\text{--}4,3\text{ А/см}^2$ ; в) для электрокорундовых —  $2,8\text{--}10,6\text{ А/см}^2$ .

Оценивая приведенные выше величины плотностей токов коротких сетей действующих печных установок, следует отметить, что для проводников с естественным воздушным охлаждением они лежат, как правило, в диапазонах, обеспечивающих их работу при  $90\text{--}120^\circ\text{C}$  (несколько больших допускаемых ПУЭУ) [10], а для проводников с водяным охлаждением они близки к экономически целесообразным значениям.

#### **4. Реактивные и активные сопротивления руднотермических печей**

Электрические характеристики печной установки определяются величинами сопротивлений в эквивалентной схеме звезды (рис. 1.1, а), характеризующими потери реактивной и активной энергии. Реактивные сопротивления каждой фазы эквивалентной схемы определяются сопротивлениями следующих ее элементов: электропечной трансформатор, короткая сеть, включая компенсаторы, шинный пакет, пакет гибких проводников и электродо-

---

<sup>1</sup> Здесь и далее под максимальной потребляемой мощностью подразумевается максимальная часовая мощность, на которой печь может стабильно работать при соблюдении норм технологического режима.

## ЗНАЧЕНИЯ РЕАКТИВНЫХ (x) И АКТИВНЫХ (r)

| № п/п печ-<br>ной уста-<br>новки | Тип печной уста-<br>новки | Трансформа-<br>тор |      | Короткая<br>сеть |      | Электроды<br>и ванна |      | Печная<br>установка<br>на фазу x,<br>МОм |
|----------------------------------|---------------------------|--------------------|------|------------------|------|----------------------|------|------------------------------------------|
|                                  |                           | x, МОм             | %    | x, МОм           | %    | x, МОм               | %    |                                          |
| 1                                | 2                         | 3                  | 4    | 5                | 6    | 7                    | 8    | 9                                        |
| <b>Ферросплав</b>                |                           |                    |      |                  |      |                      |      |                                          |
| 1                                | РКО-4,5                   | 2,100              | 29,2 | 1,580            | 21,9 | 3,520                | 48,9 | 7,200                                    |
| 2                                | РКО-9,0                   | 0,171              | 16,0 | 0,456            | 42,8 | 0,438                | 41,2 | 1,065                                    |
| 3                                | РКО-10,5                  | 0,232              | 20,8 | 0,453            | 40,6 | 0,431                | 38,6 | 1,116                                    |
| 4                                | РКО-10,5                  | 0,232              | 21,0 | 0,453            | 41,2 | 0,417                | 37,8 | 1,102                                    |
| 5                                | РПО-11,0                  | 0,151              | 12,9 | 0,689            | 58,7 | 0,333                | 28,4 | 1,173                                    |
| 6                                | РКО-11,5                  | 0,187              | 15,8 | 0,649            | 55,0 | 0,344                | 29,2 | 1,180                                    |
| 7                                | РКО-14,0                  | 0,210              | 19,8 | 0,390            | 36,9 | 0,460                | 43,4 | 1,060                                    |
| 8                                | РКО-14,3                  | 0,197              | 19,3 | 0,414            | 40,6 | 0,409                | 40,1 | 1,020                                    |
| 9                                | РКО-15,0                  | 0,157              | 17,0 | 0,384            | 41,7 | 0,380                | 41,3 | 0,924                                    |
| 10                               | РКО-16,5                  | 0,121              | 12,2 | 0,453            | 45,8 | 0,416                | 42,0 | 0,990                                    |
| 11                               | РКО-16,5                  | 0,121              | 12,2 | 0,447            | 45,2 | 0,422                | 42,6 | 0,990                                    |
| 12                               | РКО-16,5                  | 0,121              | 12,8 | 0,427            | 45,0 | 0,400                | 42,2 | 0,948                                    |
| 13                               | РКЗ-16,5                  | 0,121              | 11,2 | 0,414            | 38,3 | 0,545                | 50,5 | 1,080                                    |
| 14                               | РКЗ-16,5                  | 0,121              | 11,5 | 0,404            | 37,7 | 0,545                | 51,7 | 1,070                                    |
| 15                               | РКЗ-16,5/у                | 0,137              | 12,8 | 0,404            | 37,7 | 0,545                | 50,9 | 1,070*                                   |
| 16                               | РКО-20,0                  | 0,081              | 8,8  | 0,309            | 55,4 | 0,330                | 35,8 | 0,780**                                  |
| 17                               | РКО-20,0                  | 0,070              | 8,0  | 0,375            | 48,1 | 0,426                | 48,9 | 0,920                                    |
| 18                               | РКЗ-21,0                  | 0,123              | 13,2 | 0,353            | 37,8 | 0,459                | 49,0 | 0,871                                    |
| 19                               | РКО-22,5                  | 0,153              | 14,3 | 0,346            | 32,4 | 0,570                | 53,3 | 0,935                                    |
| 20                               | РКЗ-27,5/у                | 0,21               | 19,1 | 0,32             | 29,1 | 0,570                | 51,8 | 1,069                                    |
| 21                               | РКО-29,0                  | 0,088              | 12,4 | 0,247            | 34,8 | 0,374                | 52,8 | 1,1                                      |
| 22                               | РКЗ-40,0/у                | 0,14               | 12,2 | 0,336            | 29,2 | 0,674                | 58,6 | 0,709                                    |
| 23                               | РПЗ-63,0/у                | 0,314              | 15,7 | 0,519            | 25,9 | 1,167                | 58,4 | 1,15                                     |
| 24                               | РКЗ-81/уп                 | 0,111              | 11,3 | 0,276            | 28,2 | 0,593                | 60,5 | 2,000**                                  |
| 25                               | РКЗ-80,0/у                | 0,090              | 7,4  | 0,390            | 32,0 | 0,740                | 60,6 | 1,075                                    |
| 26                               | РПЗ-80,0/у                | 0,188              | 9,5  | 0,737            | 37,3 | 1,05                 | 53,2 | 0,98                                     |
| <b>Карбид</b>                    |                           |                    |      |                  |      |                      |      |                                          |
| 1                                | РПО-3,0к                  | 0,180              | 13,1 | 0,764            | 55,5 | 0,433                | 31,4 | 1,377                                    |
| 2                                | РПО-7,5к                  | 0,090              | 9,6  | 0,527            | 56,1 | 0,323                | 34,3 | 0,940                                    |
| 3                                | РПО-10,0к                 | 0,218              | 15,7 | 0,775            | 55,9 | 0,393                | 28,4 | 1,386                                    |
| 4                                | РПО-15,0к                 | 0,072              | 5,8  | »                | 62,5 | »                    | 31,7 | 1,240                                    |
| 5                                | РПО-40,0к                 | 0,100              | 12,9 | 0,367            | 47,4 | 0,307                | 39,7 | 0,774                                    |
| 6                                | РПО-40,0к                 | 0,070              | 10,2 | 0,313            | 45,8 | 0,300                | 44,0 | 0,683                                    |
| 7                                | РПО-60,0к                 | 0,080              | 11,0 | 0,340            | 46,8 | 0,307                | 42,2 | 0,727                                    |
| 8                                | РПЗ-60,0к                 | 0,080              | 11,6 | 0,343            | 49,7 | 0,267                | 38,7 | 0,690                                    |
| 9                                | РПЗ-80,0к/у               | 0,070              | 8,2  | 0,310            | 36,5 | 0,47                 | 55,3 | 0,85                                     |
| 10                               | РПЗ-80,0к/у               | 0,070              | 6,5  | 0,478            | 44,2 | 0,532                | 49,3 | 1,08                                     |
| <b>Фосфор</b>                    |                           |                    |      |                  |      |                      |      |                                          |
| 1                                | РКЗ-10,5ф                 | 0,894              | 45,8 | 0,567            | 29,1 | 0,489                | 25,1 | 1,950                                    |
| 2                                | РКЗ-13,8ф                 | 0,622              | 37,7 | 0,400            | 24,2 | 0,630                | 38,1 | 1,652                                    |
| 3                                | РКЗ-33,0ф                 | 0,298              | 24,9 | 0,369            | 30,8 | 0,531                | 44,3 | 1,198                                    |
| 4                                | РКЗ-48,0ф                 | 0,241              | 20,1 | 0,406            | 33,8 | 0,553                | 46,1 | 1,200                                    |
| 5                                | РКЗ-50,0ф                 | 0,350              | 27,6 | 0,379            | 29,8 | 0,541                | 42,6 | 1,270                                    |
| 6                                | РКЗ-72,0ф (80)            | 0,330              | 21,3 | 0,600            | 38,7 | 0,620                | 40,0 | 1,550                                    |

## СОПРОТИВЛЕНИЙ РУДНОТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

| Трансформа-<br>тор |    | Короткая<br>сеть |    | Переходные сопроти-<br>вления, контактная<br>плата-электрод |    | Электрод  |    | Печная<br>установка<br>на фазу $r$ ,<br>мОм |
|--------------------|----|------------------|----|-------------------------------------------------------------|----|-----------|----|---------------------------------------------|
| $r$ , мОм          | %  | $r$ , мОм        | %  | $r$ , мОм                                                   | %  | $r$ , мОм | %  |                                             |
| 10                 | 11 | 12               | 13 | 14                                                          | 15 | 16        | 17 |                                             |

## ные печи

|       |       |       |      |       |      |       |      |       |
|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| 0,390 | 29,4  | 0,280 | 21,1 | 0,285 | 21,5 | 0,372 | 28,0 | 1,327 |
| 0,036 | 20,80 | 0,043 | 24,9 | 0,027 | 15,6 | 0,067 | 38,7 | 0,173 |
| 0,036 | 20,1  | 0,041 | 22,9 | 0,027 | 15,1 | 0,075 | 41,9 | 0,179 |
| »     | 21,8  | 0,041 | 24,8 | 0,027 | 16,4 | 0,061 | 37,0 | 0,165 |
| 0,025 | 10,2  | 0,109 | 44,7 | 0,066 | 27,0 | 0,044 | 18,1 | 0,244 |
| 0,045 | 17,4  | 0,120 | 46,3 | 0,027 | 10,4 | 0,067 | 25,9 | 0,259 |
| 0,034 | 15,5  | 0,091 | 41,6 | 0,027 | 12,3 | 0,067 | 30,6 | 0,219 |
| 0,031 | 18,3  | 0,044 | 26,0 | 0,027 | 16,0 | 0,067 | 39,7 | 0,169 |
| 0,032 | 20,5  | 0,042 | 26,9 | 0,027 | 17,3 | 0,055 | 35,3 | 0,156 |
| 0,027 | 19,4  | 0,043 | 30,9 | 0,027 | 19,4 | 0,042 | 30,3 | 0,139 |
| 0,027 | 19,6  | 0,042 | 30,4 | 0,027 | 19,6 | 0,042 | 30,4 | 0,138 |
| 0,027 | 19,6  | 0,042 | 30,4 | 0,027 | 19,6 | 0,042 | 30,4 | 0,138 |
| 0,027 | 17,0  | 0,036 | 22,6 | 0,027 | 17,0 | 0,069 | 43,4 | 0,159 |
| 0,027 | 17,0  | 0,036 | 22,6 | 0,027 | 17,0 | 0,069 | 43,4 | 0,159 |
| 0,027 | 17,0  | 0,036 | 22,6 | 0,027 | 17,0 | 0,069 | 43,4 | 0,159 |
| 0,030 | 15,8  | 0,044 | 23,2 | 0,046 | 26,0 | 0,067 | 35,0 | 0,191 |
| 0,020 | 8,1   | 0,064 | 28,5 | 0,056 | 24,8 | 0,085 | 37,6 | 0,225 |
| 0,021 | 13,9  | 0,034 | 22,5 | 0,027 | 17,9 | 0,069 | 45,7 | 0,151 |
| 0,020 | 13,3  | 0,034 | 22,7 | 0,027 | 18,0 | 0,069 | 46,0 | 0,150 |
| 0,017 | 12,6  | 0,022 | 16,3 | 0,035 | 25,9 | 0,061 | 45,2 | 0,135 |
| 0,020 | 11,0  | 0,048 | 27,1 | 0,040 | 22,1 | 0,072 | 39,8 | 0,180 |
| 0,020 | 14,7  | 0,045 | 33,1 | 0,32  | 23,5 | 0,039 | 28,7 | 0,136 |
| 0,032 | 16,0  | 0,060 | 30,0 | 0,058 | 29,0 | 0,050 | 25,0 | 0,200 |
| 0,043 | 34,7  | 0,023 | 18,5 | 0,04  | 32,3 | 0,018 | 14,5 | 0,124 |
| 0,021 | 18,9  | 0,035 | 31,5 | 0,035 | 31,5 | 0,02  | 18,1 | 0,111 |
| 0,017 | 11,5  | 0,034 | 23,0 | 0,058 | 39,2 | 0,039 | 26,3 | 0,148 |

## ные печи

|       |      |       |      |       |      |       |      |       |
|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| 0,057 | 15,4 | 0,009 | 24,4 | 0,086 | 23,3 | 0,217 | 58,8 | 0,369 |
| 0,035 | 14,3 | 0,072 | 29,4 | 0,033 | 13,5 | 0,105 | 42,8 | 0,245 |
| 0,044 | 16,9 | 0,087 | 33,5 | 0,066 | 25,4 | 0,063 | 24,2 | 0,260 |
| 0,025 | 10,4 | »     | 36,1 | »     | 27,4 | »     | 26,1 | 0,241 |
| 0,026 | 23,0 | 0,016 | 14,2 | 0,024 | 21,2 | 0,047 | 41,6 | 0,113 |
| 0,014 | 11,8 | 0,018 | 15,1 | 0,040 | 33,6 | »     | 39,5 | 0,119 |
| »     | 12,8 | 0,016 | 14,7 | 0,032 | 29,4 | »     | 43,1 | 0,109 |
| »     | 18,2 | 0,010 | 13,0 | 0,020 | 26,0 | 0,033 | 42,8 | 0,077 |
| 0,010 | 12,5 | 0,016 | 20,0 | 0,022 | 27,5 | 0,032 | 40,0 | 0,08  |
| 0,003 | 3,8  | 0,027 | 34,6 | 0,023 | 29,5 | 0,025 | 32,1 | 0,078 |

## ные печи

|       |      |       |      |       |      |       |      |       |
|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| 0,080 | 37,8 | 0,042 | 13,5 | 0,042 | 13,5 | 0,110 | 36,2 | 0,312 |
| 0,067 | 46,9 | 0,014 | 9,8  | 0,028 | 19,6 | 0,034 | 23,7 | 0,143 |
| 0,042 | 36,0 | »     | 11,7 | »     | 23,3 | 0,036 | 30,0 | 0,120 |
| 0,024 | 22,2 | 0,013 | 12,0 | 0,035 | 32,4 | »     | 33,4 | 0,108 |
| 0,030 | 33,3 | 0,010 | 11,1 | 0,012 | 13,3 | 0,038 | 42,3 | 0,090 |
| 0,030 | 27,8 | 0,018 | 16,7 | 0,034 | 31,5 | 0,026 | 24,0 | 0,108 |



| № п/п печ-<br>ной уста-<br>новки | Тип печной уста-<br>новки | Трансформа-<br>тор |   | Короткая сеть |   | Электроды и<br>ванна |   | Печная<br>установка<br>на фазу х,<br>мОм |
|----------------------------------|---------------------------|--------------------|---|---------------|---|----------------------|---|------------------------------------------|
|                                  |                           | х, мОм             | % | х, мОм        | % | х, мОм               | % |                                          |
| 1                                | 2                         | 3                  | 4 | 5             | 6 | 7                    | 8 | 9                                        |

*Электрокорун*

|   |            |      |      |      |      |      |      |      |
|---|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | РКЗ-1,3эк  | 0,80 | 18,0 | 2,23 | 50,1 | 1,42 | 31,9 | 4,45 |
| 2 | РКЗ-1,6эк  | 0,75 | 15,2 | 2,14 | 43,2 | 2,06 | 41,6 | 4,95 |
| 3 | РКО-1,9эк  | 0,80 | 14,9 | 2,23 | 37,5 | 2,76 | 47,6 | 5,79 |
| 4 | РКЗ-4,5эк  | 1,08 | 23,9 | 1,70 | 37,7 | 1,78 | 38,4 | 4,51 |
| 5 | РКЗ-5,5эк  | 0,64 | 20,6 | 1,03 | 33,2 | 1,43 | 46,2 | 3,10 |
| 6 | РКЗ-6,5эк  | 0,89 | 22,5 | 1,12 | 28,4 | 1,94 | 49,1 | 3,95 |
| 7 | РКО-10,5эк | 0,32 | 22,7 | 0,46 | 32,6 | 0,63 | 44,7 | 1,41 |
| 8 | РКО-16,5эк | 0,16 | 11,9 | 0,45 | 33,3 | 0,74 | 54,8 | 1,35 |

*Печи цветной*

|   |          |      |      |      |      |       |      |      |
|---|----------|------|------|------|------|-------|------|------|
| 1 | РКО-7,9ц | 1,56 | 39,3 | 1,95 | 49,1 | 0,460 | 11,6 | 3,97 |
| 2 | РПЗ-20ц  | 1,10 | 42,3 | 0,93 | 35,7 | 0,570 | 22,0 | 2,60 |

\* С учетом разделительных трансформаторов и их ошиновки  $X_{\text{д}}=0,016$  мОм.

\*<sup>2</sup> Учтено УПК= $-0,292$  мОм.

\*<sup>3</sup> Учтено УПК= $-0,925$  мОм.

\*<sup>4</sup> В знаменателе приведены данные с учетом потерь в металлоконструк

держатель (без электродов), электроды и участок прохождения тока внутри ванны печи.

Активные сопротивления, определяющие электрические характеристики, включают: электропечной трансформатор, короткую сеть (включая ту часть электродов, в которой имеют место непроизводительные потери энергии), и переходное сопротивление контактных щек. Здесь и в дальнейшем будут приводиться только значения активных сопротивлений, определяющих потери энергии.

В табл. 3.5 приведены средние значения величин реактивных и активных сопротивлений одной фазы эквивалентной звезды, указанных выше участков электропечного контура и их относительные значения в процентах. Эквивалентные сопротивления трансформатора, приведенные к низшей стороне, определялись с привлечением данных табл. 3.2 по следующим формулам:

$$x_{\tau} = \sqrt{\left(\frac{e_{\kappa} U_{\text{ф.н.н}}}{100 I_{\text{н.н}}}\right)^2 - r_{\tau}^2} \quad (\text{III.1})$$

$$r_{\tau} = \frac{P_{\kappa.з} \cdot 10^3}{3 I_{\text{н.н}}^2}$$

| Трансформатор |    | Короткая сеть |    | Переходные сопротивления, контактная планта-электрод |    | Электрод  |    | Печная установка на фазу $r$ , мОм |
|---------------|----|---------------|----|------------------------------------------------------|----|-----------|----|------------------------------------|
| $r$ , мОм     | %  | $r$ , мОм     | %  | $r$ , мОм                                            | %  | $r$ , мОм | %  |                                    |
| 10            | 11 | 12            | 13 | 14                                                   | 15 | 16        | 17 | 18                                 |

## доменные печи

|       |      |       |      |       |      |       |      |       |
|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| 0,34  | 57,1 | 0,056 | 9,4  | 0,035 | 5,9  | 0,165 | 27,6 | 0,596 |
| 0,31  | 51,8 | 0,084 | 14,0 | 0,040 | 6,8  | 0,165 | 27,6 | 0,599 |
| 0,34  | 57,1 | 0,056 | 9,4  | 0,035 | 5,9  | »     | »    | 0,596 |
| 0,19  | 40,8 | 0,080 | 17,2 | 0,040 | 8,6  | 0,156 | 33,4 | 0,466 |
| 0,18  | 41,8 | 0,064 | 14,8 | 0,032 | 7,4  | 0,155 | 35,0 | 0,431 |
| 0,13  | 27,1 | 0,075 | 15,6 | 0,033 | 6,9  | 0,242 | 50,4 | 0,480 |
| 0,04  | 23,6 | 0,041 | 24,3 | 0,028 | 16,6 | 0,060 | 35,5 | 0,169 |
| 0,068 | 30,2 | 0,047 | 20,9 | 0,040 | 17,8 | 0,070 | 31,1 | 0,225 |

## металлургии

|       |      |       |      |       |      |       |      |                        |
|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|------------------------|
| 0,126 | 17,8 | 0,055 | 35,3 | 0,070 | 9,90 | 0,262 | 37,4 | 0,708                  |
| 0,062 | 11,4 | 0,028 | 4,95 | 0,040 | 7,38 | 0,212 | 39,1 | $\frac{0,3^{**}}{0,5}$ |

циях.

где  $e_k$  — напряжение короткого замыкания, %;  $U_{ф.н.}$  — номинальное фазное напряжение со стороны низшего напряжения, В;  $I_{н.н.}$  — номинальный линейный ток, протекающий по электроду, А;  $P_{к.з.}$  — потери короткого замыкания всех трех фаз электропечного агрегата, кВт.

Для трехфазных печей фазное напряжение равно  $U_{ф.н.н.} = U_{л.н.н.} / \sqrt{3}$ , где  $U_{л.н.н.}$  — линейное напряжение на выводах трансформатора.

Для шестиэлектродных печей, у которых каждая пара электродов питается от одного однофазного трансформатора,  $U_{ф.н.н.}$  соответствует напряжению на трансформаторе. Сопротивления короткой сети, электродов и ванн определены на основании данных измерений на действующих печных установках, проведенных институтами ВНИИЭТО, ЛенНИИГИПРОХИМ, ВАМИ, предприятием Центроэнергочермет, а также рассчитаны авторами по эксплуатационным данным.

Исследования коротких сетей большинства ферросплавных, фосфорных и карбидных печей проводились на действующих печных установках с одновременным выполнением физического моделирования, а также расче-

тов большого числа вариантов их модернизации. Данные по сопротивлению ферросплавных печей №№ 2, 4, 6, 8, 18, 19 и некоторых других определены исходя из обработки средневзвешенных значений реактивных и активных мощностей и рабочих напряжений, которые принимались по оперативным журналам эксплуатационного персонала.

*а) Реактивные сопротивления печей большой мощности (30—80 МВ·А)*

В табл. 3.5 приведены значения реактивных ( $x$ ) и активных ( $r$ ) сопротивлений руднотермических печей.

Анализ этой таблицы показывает, что реактивные сопротивления трансформаторов для трехэлектродных ферросплавных и карбидных печей большой мощности лежат в пределах 0,07—0,20 мОм (меньшие значения относятся к печам большей мощности). Шестиэлектродные ферросплавные печи имеют то же значение реактивного сопротивления трансформаторов, приходящегося на один электрод, из чего следует, что их сопротивление на фазу будет в два раза выше (0,2—0,3 мОм).

Фосфорные печи, имеющие относительно меньшие отношения тока к напряжению, оборудованы трансформаторами со значительно более высокими эквивалентными реактивными сопротивлениями (0,24—0,62 мОм). Следует отметить, что наименьшее значение относится к трансформатору ЭОЦНС-30000/35, который в настоящее время снят с производства из-за пониженной надежности, заменивший его трансформатор, имеет реактивное сопротивление порядка 0,35 мОм.

Реактивное сопротивление коротких сетей печей большой мощности лежит в пределах 0,25—0,60 мОм.

Реактивное сопротивление электродов и ванн этой группы печей лежит в широких пределах от 0,30 до 0,74 мОм и определяет колебания суммарного реактивного сопротивления электропечного контура, которое составляет для трехэлектродных ферросплавных печей 0,70—1,22 мОм.

Ферросплавные печи с верхним токоподводом (№ 16) и с глубокими боковыми токоподводами №№ 17, 20 имеют суммарное реактивное сопротивление примерно на 10—20 % ниже (0,71—0,92 мОм). Более значительный эффект достигается для открытых печей с глубоким боковым вводом. При этом для печей средней мощности с верхним токоподводом сокращается реактивное сопро-

тивление электродов и ванны до величины 0,33 мОм, вместо 0,5 мОм и во втором случае короткой сети до величины 0,38 мОм, вместо 0,5—0,6 мОм в традиционных конструкциях. Для руднотермических печей большой мощности применение верхнего токоподвода дает сокращение реактивного сопротивления всего контура с 1,22 до 0,98 мОм, т. е. примерно на 25 % за счет резкого сокращения сопротивления гибкой части короткой сети, а также за счет сокращения реактивности ванны.

Для трехэлектродных прямоугольных карбидных печей реактивное сопротивление контура 0,68—1,1 мОм; трехэлектродных фосфорных печей — 1,2—1,6 мОм; шестиэлектродных ферросплавных печей — 2,0—2,4 мОм.

Распределение реактивного сопротивления по участкам короткой сети и по фазам (I, II, III) различных типов печей приведены в табл. 3.6 и 3.7, где в качестве примеров рассмотрены:

1) круглые трехэлектродные печи с расположением трансформаторов с одной стороны: импортная ферросплавная печь РКЗ-81уП, отечественные ферросплавные печи РКО-16,5, РКЗ-13,8, РКЗ-16,5, РКО-20 (с верхним токоподводом); РКО-20 (с глубоким боковым вводом); РКО-29;

2) прямоугольные карбидные печи со схемой «звезда на трансформаторе» (РПО-60к, РПО-10к);

3) прямоугольная карбидная печь со схемой «треугольник на электродах» (РПО-40к);

4) шестиэлектродная печь РПЗ-63,0уу;

5) фосфорная печь РКЗ-48ф с симметричной короткой сетью.

Из табл. 3.6, 3.7 следует, что фазные сопротивления существенно отличаются лишь у прямоугольных печей (независимо от схемы короткой сети), а у круглых печей с расположением трансформатора с одной стороны они практически равны. Кроме того, следует отметить, что участками, определяющими реактивное сопротивление короткой сети, являются трубки электрододержателя и гибкие проводники, а шинный пакет с бифилярным расположением проводников составляет лишь 8—10 % от общего сопротивления.

Рассмотренные выше реактивные сопротивления определены для номинальных токов печной установки. При работе печи на меньших токах их реактивное сопротивление несколько возрастает. Для карбидных и ферросплавных печей это увеличение лежит в пределах 5—7 %

ЗНАЧЕНИЯ РЕАКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ УЧАСТКОВ КОРОТКИХ СЕТЕЙ КРУГЛЫХ РУДНОТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

| Участок печной установки     | РКО-10,5 |           |            |          |       | РКО-16,5 |           |            |          |       |
|------------------------------|----------|-----------|------------|----------|-------|----------|-----------|------------|----------|-------|
|                              | I<br>МОм | II<br>МОм | III<br>МОм | I+II+III |       | I<br>МОм | II<br>МОм | III<br>МОм | I+II+III |       |
|                              |          |           |            | МОм      | %     |          |           |            | МОм      | %     |
| I. Трансформатор . . . . .   | 0,23     | 0,23      | 0,23       | 0,69     | 20,7  | 0,12     | 0,12      | 0,12       | 0,36     | 12,1  |
| II. Короткая сеть . . . . .  | 0,48     | 0,42      | 0,45       | 1,35     | 40,5  | 0,47     | 0,41      | 0,47       | 1,35     | 45,5  |
| в том числе:                 |          |           |            |          |       |          |           |            |          |       |
| шинный пакет . . . . .       | —        | —         | —          | 0,27     | 8,1   | 0,11     | 0,05      | 0,11       | 0,27     | 9,1   |
| подвижная часть . . . . .    | —        | —         | —          | 1,08     | 32,4  | 0,36     | 0,36      | 0,36       | 1,08     | 36,4  |
| в том числе:                 |          |           |            |          |       |          |           |            |          |       |
| гибкие ленты или кабели .    | —        | —         | —          | 0,41     | 12,3  | 0,12     | 0,12      | 0,12       | 0,36     | 12,1  |
| трубки электрододержателя    | —        | —         | —          | 0,67     | 20,1  | 0,24     | 0,24      | 0,24       | 0,72     | 24,3  |
| III. Электроды и ванна . . . | 0,43     | 0,43      | 0,43       | 1,29     | 38,8  | 0,42     | 0,42      | 0,42       | 1,26     | 42,4  |
| Итого . . . . .              | 1,14     | 1,08      | 1,11       | 3,33     | 100,0 | 1,01     | 0,95      | 1,01       | 2,97     | 100,0 |

| Участок печной установки     | РКЗ-16,5 |           |            |          |       | РКЗ-13 8 ф |           |            |          |       | РКЗ-48 ф        |       |
|------------------------------|----------|-----------|------------|----------|-------|------------|-----------|------------|----------|-------|-----------------|-------|
|                              | I<br>МОм | II<br>МОм | III<br>МОм | I+II+III |       | I<br>МОм   | II<br>МОм | III<br>МОм | I+II+III |       | I+II+III<br>МОм | %     |
|                              |          |           |            | МОм      | %     |            |           |            | МОм      | %     |                 |       |
| I. Трансформатор . . .       | 0,12     | 0,12      | 0,12       | 0,36     | 11,2  | 0,62       | 0,62      | 0,62       | 1,86     | 37,6  | 0,72            | 20,0  |
| II. Короткая сеть            | 0,42     | 0,36      | 0,42       | 1,20     | 37,4  | 0,42       | 0,39      | 0,39       | 1,20     | 24,2  | 1,23            | 34,2  |
| в том числе:                 |          |           |            |          |       |            |           |            |          |       |                 |       |
| шинный пакет . . .           | 0,10     | 0,04      | 0,10       | 0,24     | 7,5   | 0,06       | 0,03      | 0,03       | 0,12     | 2,4   | 0,21            | 5,8   |
| подвижная часть              | 0,32     | 0,32      | 0,32       | 0,96     | 29,9  | 0,36       | 0,36      | 0,36       | 1,08     | 21,8  | 1,02            | 28,4  |
| в том числе:                 |          |           |            |          |       |            |           |            |          |       |                 |       |
| гибкие ленты или кабели      | 0,15     | 0,15      | 0,15       | 0,45     | 14,0  | 0,19       | 0,19      | 0,19       | 0,57     | 11,5  | 0,36            | 10,0  |
| трубки электрододержателя    | 0,17     | 0,17      | 0,17       | 0,51     | 15,9  | 0,17       | 0,17      | 0,17       | 0,51     | 10,3  | 0,66            | 18,4  |
| III. Электроды и ванна . . . | 0,55     | 0,55      | 0,55       | 1,65     | 51,4  | 0,63       | 0,63      | 0,63       | 1,89     | 38,2  | 1,65            | 45,8  |
| Итого . . . . .              | 1,09     | 1,03      | 1,09       | 3,21     | 100,0 | 1,67       | 1,64      | 1,64       | 4,95     | 100,0 | 3,60            | 100,0 |

| Участок пещной установки  | РКО-20 (с верхним токопроводом) |       | РКО-20 (с глубоким боковым вводом) |       | РКО-29   |       | РКЗ-81/уп |      | РКЗ-72 ф (80,0) |           |            |                 |       |
|---------------------------|---------------------------------|-------|------------------------------------|-------|----------|-------|-----------|------|-----------------|-----------|------------|-----------------|-------|
|                           | I+II+III                        |       | I+II+III                           |       | I+II+III |       | I+II+III  |      | I<br>МОм        | II<br>МОм | III<br>МОм | I+II+III<br>МОм | %     |
|                           | МОм                             | %     | МОм                                | %     | МОм      | %     | МОм       | %    |                 |           |            |                 |       |
|                           |                                 |       |                                    |       |          |       |           |      |                 |           |            |                 |       |
| I. Трансформатор          | 0,243                           | 8     | 0,210                              | 8,0   | 0,264    | 12,4  | 0,333     | 11,3 | 0,33            | 0,33      | 0,33       | 0,99            | 20,7  |
| II. Короткая сеть         | 1,527                           | 55,3  | 1,125                              | 43,1  | 0,741    | 34,8  | 0,828     | 28,2 | 0,66            | 0,59      | 0,66       | 1,91            | 39,8  |
| в том числе:              |                                 |       |                                    |       |          |       |           |      |                 |           |            |                 |       |
| шинный пакет              | 0,177                           | 6,4   | 0,282                              | 10,8  | 0,159    | 7,5   |           |      | 0,21            | 0,14      | 0,21       | 0,56            | 11,7  |
| подвижная часть           | 1,35                            | 48,9  | 0,843                              | 32,3  | 0,582    | 27,4  | 0,483     | 16,5 | 0,45            | 0,45      | 0,45       | 1,35            | 28,1  |
| в том числе:              |                                 |       |                                    |       |          |       |           |      |                 |           |            |                 |       |
| гибкие ленты или кабелн   | 0,198                           | 7,2   | 0,240                              | 9,2   | 0,240    | 11,3  | 0,345     | 11,7 | 0,45            | 0,45      | 0,45       | 1,35            | 28,1  |
| трубки электрододержателя | 1,152                           | 41,7  | 0,603                              | 23,1  | 0,342    | 16,1  | —         | —    | 0,13            | 0,13      | 0,13       | 0,39            | 8,1   |
| III. Электроды и ванна    | 0,990                           | 35,9  | 1,278                              | 48,9  | 1,122    | 52,8  | 1,779     | 60,5 | 0,32            | 0,32      | 0,32       | 0,96            | 20,0  |
| Итого                     | 2,760                           | 100,0 | 2,613                              | 100,0 | 2,127    | 100,0 | 2,94      | 100  | 1,62            | 1,55      | 1,62       | 4,79            | 100,0 |

Таблица 37

Значения реактивных сопротивлений участков коротких сетей прямоугольных  
руднотермических печей

| Участок печной установки  | РПО-10 0 К |           |            |          |       | РПО-40,0 К |           |            |          |       |
|---------------------------|------------|-----------|------------|----------|-------|------------|-----------|------------|----------|-------|
|                           | I<br>мОм   | II<br>мОм | III<br>мОм | I+II+III |       | I<br>мОм   | II<br>мОм | III<br>мОм | I+II+III |       |
|                           |            |           |            | мОм      | %     |            |           |            | мОм      | %     |
| I. Трансформатор          | 0,22       | 0,22      | 0,22       | 0,66     | 15,8  | 0,07       | 0,07      | 0,07       | 0,21     | 10,3  |
| II. Короткая сеть         | 0,89       | 0,56      | 0,89       | 2,34     | 56,1  | 0,32       | 0,20      | 0,41       | 0,93     | 45,6  |
| в том числе:              |            |           |            |          |       |            |           |            |          |       |
| шинный пакет              | 0,45       | 0,16      | 0,45       | 1,06     | 25,4  | —          | —         | —          | 0,43     | 21,1  |
| подвижная часть           | 0,44       | 0,40      | 0,44       | 1,28     | 30,7  | —          | —         | —          | 0,50     | 24,5  |
| в том числе:              |            |           |            |          |       |            |           |            |          |       |
| гибкие ленты или кабели   | 0,09       | 0,08      | 0,09       | 0,26     | 6,2   | —          | —         | —          | —        | —     |
| трубки электрододержателя | 0,35       | 0,32      | 0,35       | 1,02     | 24,5  | —          | —         | —          | —        | —     |
| III. Электроды и ванна    | 0,47       | 0,23      | 0,47       | 1,17     | 28,1  | 0,31       | 0,23      | 0,36       | 0,90     | 44,1  |
| Итого . . . . .           | 1,58       | 1,01      | 1,58       | 4,17     | 100,0 | 0,70       | 0,50      | 0,84       | 2,04     | 100,0 |



| Участок печной установки  | РПО-60,0 К |           |            |          |       | РПЗ-63,0 |           |            |          |       |
|---------------------------|------------|-----------|------------|----------|-------|----------|-----------|------------|----------|-------|
|                           | I<br>мОм   | II<br>мОм | III<br>мОм | I+II+III |       | I<br>мОм | II<br>мОм | III<br>мОм | I+II+III |       |
|                           |            |           |            | мОм      | %     |          |           |            | мОм      | %     |
| I. Трансформатор          | 0,08       | 0,08      | 0,08       | 0,24     | 11,6  | 0,31     | 0,31      | 0,31       | 0,93     | 15,5  |
| II. Короткая сеть         | 0,50       | 0,31      | 0,21       | 1,02     | 49,3  | 0,52     | 0,52      | 0,52       | 1,56     | 26,0  |
| в том числе:              |            |           |            |          |       |          |           |            |          |       |
| шинный пакет              | 0,29       | 0,14      | 0,01       | 0,44     | 21,3  | 0,22     | 0,22      | 0,22       | 0,66     | 11,0  |
| подвижная часть           | 0,21       | 0,17      | 0,20       | 0,58     | 28,0  | 0,30     | 0,30      | 0,30       | 0,90     | 15,0  |
| в том числе:              |            |           |            |          |       |          |           |            |          |       |
| гибкие ленты или кабели   | 0,11       | 0,08      | 0,10       | 0,29     | 14,0  | 0,07     | 0,07      | 0,07       | 0,21     | 3,5   |
| трубки электрододержателя | 0,10       | 0,09      | 0,10       | 0,29     | 14,0  | 0,23     | 0,23      | 0,23       | 0,69     | 11,5  |
| III. Электроды и ванна    | 0,35       | 0,22      | 0,24       | 0,81     | 39,1  | 1,15     | 1,21      | 1,15       | 3,51     | 58,5  |
| Итого                     | 0,93       | 0,61      | 0,53       | 2,07     | 100,0 | 1,98     | 2,04      | 1,98       | 6,00     | 100,0 |

и может не учитываться при расчете их параметров. Как показала статистическая обработка данных реактивных сопротивлений фосфорных печей, этот фактор для этого типа печей играет большую роль, и при определении их реактивного сопротивления может быть использовано выражение [11]:

$$x_y = x_{y,n}(I/I_n)^{-k},$$

где  $x_y$  — значение реактивного сопротивления всей установки при токе  $I$ ;  $x_{y,n}$  — то же при номинальном токе  $I_n$ ;  $k$  — коэффициент, который для печей мощностью 50 МВ·А лежит в пределах 0,25—0,30, а для печей 10—20 МВ·А он несколько выше и составляет 0,6—0,7;

*б) Реактивные сопротивления печей  
средней мощности (4,5—15,0 МВ·А).*

Печи средней мощности имеют, как правило, сопротивления участков электропечного контура выше, чем соответствующие электропечные агрегаты большой мощности. При этом колебания величин сопротивлений весьма высоки, так как в ряде случаев их конструкции далеки от оптимальных. Большие сопротивления имеют печи РКЗ-4,5 и РКЗ-5,5, которые принципиально отличаются от других печей наличием наклоняющейся ванны и режимом работы, близким к сталеплавильным печам. Повышенное реактивное сопротивление имеют также фосфорные печи средней мощности типа РКЗ-10,5ф и РКЗ-13,8ф (табл. 3.6 и 3.7). Прямоугольные печи с расположением трансформаторов с широкой стороны печи имеют реактивное сопротивление примерно на 40 % больше, чем у печей большой мощности, имеющих расположение трансформатора с узкой стороны печи. При этом характер асимметрии сопротивлений обоих типов печей практически одинаков (см. табл. 3.7).

*в) Активные сопротивления*

Активное сопротивление короткой сети печных установок (табл. 3.5) лежит в пределах 0,01—0,10 мОм. Нижний предел 0,01—0,05 мОм характерен для коротких сетей печей большой мощности 40,0—60,0 МВ·А. Печи средней мощности (15,0—22,0 МВ·А) имеют сопротивление коротких сетей в пределах 0,035—0,050 мОм, и только печи меньшей мощности имеют короткие сети с величиной сопротивления, приближающейся к верхнему пределу. Существенную величину сопротивления имеют участки

контакта щека — электрод и самих электродов. Следует отметить, что эти величины в значительной степени изменяются в процессе эксплуатации в зависимости от условий работы печной установки. Величины активных сопротивлений электродов, указанные в таблице, относятся к участку, на котором имеют место потери электрической энергии. Длина этого участка принималась для открытых печей равной 0,8 м, а для закрытых печей — 1,3—1,5 м. Удельное сопротивление электрода принималось по данным замеров на действующих печах в пределах 60—80 мОм·см.

## 5. Электрические характеристики руднотермических печей

В табл. 3.8. приведены электрические характеристики действующих печей. Электрические параметры этих печей определены для рабочих токов и напряжений, соответствующих режиму потребления максимальной активной мощности, который выбирался по данным эксплуатации при нормальном технологическом процессе. Электрические параметры, соответствующие рабочему режиму, имеют индекс «р».

В процессе эксплуатации руднотермические печи по целому ряду причин могут иметь потребляемую из сети активную мощность менее указанной в табл. 3.8. Статистические данные свидетельствуют о том, что коэффициент использования максимальной мощности (представляющий собой отношение средней мощности за фактически отработанное время к максимальной) определяется особенностями технологического процесса и равен для печей: а) ферросплавных и карбидных мощностью 4,5—29,0 МВ·А — 0,95—0,92; б) ферросплавных типа РПЗ-48—0,90; в карбидных мощностью 40—60 МВ·А — 0,85—0,80; г) фосфорных мощностью 50 МВ·А — 0,80—0,65.

Как видно из табл. 3.8, у большинства руднотермических печей трансформатор загружается на полную мощность, а у целого ряда печей используется его перегрузочная способность. У печей РПЗ-60к, РКЗ-72ф, РКЗ-81уП и у некоторых других имеется запас трансформаторной мощности. Электрические режимы ферросплавных и карбидных печей близки друг к другу, а фосфорные печи имеют относительно более высокое напряжение. Печи с круглой ванной даже при несимметричной

короткой сети с трехфазным трансформатором имеют незначительный перекося полезных мощностей (не более 2—5 %), а у прямоугольных карбидных печей он достигает 30—40 %, несмотря на применение метода их выравнивания путем перекося напряжения на трансформаторе.

Коэффициент мощности ферросплавных печей лежит в пределах 0,95—0,55, причем низшее значение относится к печам большой мощности. Применение искусственной компенсации реактивной мощности позволяет повысить их  $\cos \varphi$  до величины 0,92—0,95. Карбидные печи средней мощности имеют  $\cos \varphi$  0,93—0,78, а карбидные печи большой мощности имеют  $\cos \varphi$  0,88—0,66. Фосфорные печи, печи никелевого штейна имеют более высокий  $\cos \varphi$ , который лежит в пределах 0,97—0,88.  $\cos \varphi$  электрокорундовых печей имеет весьма большие значения (0,91—0,97).

Наиболее низкое значение коэффициента мощности имеют печи по производству силикоалюминия, который составляет величину 0,70—0,72. Такие различия в величинах  $\cos \varphi$  объясняются в основном различием токов и напряжений для печей, производящих различные продукты. Печи, требующие для нормального производственного процесса большие токи и меньшие напряжения при одной и той же мощности, имеют более низкое значение  $\cos \varphi$ .

Электрические характеристики определялись по следующим формулам:

$$P_c = S \cos \varphi, \quad \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + (\gamma x)^2}},$$

$$P_{\text{пот}} = 3I^2 r, \quad P_{\text{пол}} = P_c - P_{\text{пот}},$$

$$\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P_c},$$

где  $P_c$  — мощность, потребляемая из сети,  $P_{\text{пот}}$  — мощность, определяющая потери энергии в печном контуре;  $P_{\text{пол}}$  — полезная мощность;  $\cos \varphi$  — коэффициент мощности;  $x$  — реактивное сопротивление печной установки на фазу;  $r$  — активное сопротивление печной установки на фазу, определяющее потери энергии; для трехэлектродных печей  $\gamma = \sqrt{3}I/U_n$ , для шестиэлектродных печей  $\gamma = I/U_\phi$ .

Величины рабочих токов и напряжений принимались исходя из статистической обработки данных эксплуатации печей.

В табл. 3.9 приведены электрические характеристики

| № п/п установ-<br>ки | Тип печной<br>установки | Основной продукт            | Установленная мощ-<br>ность трансформато-<br>ра, $S_{тр}$<br>МВ·А | Полная рабочая<br>мощность печи, $S_p$<br>МВ·А | Рабочий ток в элект-<br>роде $I_p$ , кА | Рабочее напряжение<br>$U_p$ , В |
|----------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|
| 1                    | 2                       | 3                           | 4                                                                 | 5                                              | 6                                       | 7                               |
| <i>Ферросплав</i>    |                         |                             |                                                                   |                                                |                                         |                                 |
| 1                    | РКО-4,5                 | Рафинированный<br>феррохром | 4,50                                                              | 4,26                                           | 7,0                                     | 351,0                           |
| 2                    | РКО-9,0                 | Ферросиликохром             | 9,00                                                              | 10,0                                           | 38,8                                    | 149,0                           |
| 3                    | РКО-10,5                | Ферросилиций<br>Si75        | 10,50                                                             | 10,80                                          | 40,0                                    | 156,0                           |
| 4                    | РКО-10,5                | Феррохром                   | 10,50                                                             | 10,65                                          | 38,4                                    | 160,0                           |
| 5                    | РПО-11,0                | Ферромарганец               | 11,15                                                             | 10,25                                          | 42,0                                    | 141,0                           |
| 6                    | РКО-11,5                | Ферросиликохром             | 11,50                                                             | 10,80                                          | 39,0                                    | 160,0                           |
| 7                    | РКО-14,0                | Силикохром                  | 13,95                                                             | 12,99                                          | 46,0                                    | 163,0                           |
| 8                    | РКО-14,3                | Ферросиликохром             | 14,30                                                             | 13,50                                          | 50,3                                    | 155,0                           |
| 9                    | РКО-15,0                | Силикокальций               | 15,07                                                             | 13,22                                          | 57,0                                    | 134,0                           |
| 10                   | РКО-16,5                | Ферросилиций<br>Si75        | 16,50                                                             | 19,10                                          | 63,0                                    | 175,0                           |
| 11                   | РКО-16,5                | Феррохром                   | 16,50                                                             | 16,85                                          | 54,5                                    | 178,5                           |
| 12                   | РКО-16,5                | Ферросиликохром             | 16,50                                                             | 18,97                                          | 63,3                                    | 173,0                           |
| 13                   | РКЗ-16,5                | Ферросилиций<br>Si75        | 16,50                                                             | 17,75                                          | 57,0                                    | 180,0                           |
| 14                   | РКЗ-16,5                | Силикомарганец              | 16,50                                                             | 17,29                                          | 53,4                                    | 187,0                           |
| 15                   | РКЗ-16,5У               | Силикомарганец              | 16,50                                                             | 17,29                                          | 53,4                                    | 187,0                           |
| 16                   | РКО-20,0                | Ферросилиций<br>Si75        | 20,00                                                             | 16,89                                          | 55,3                                    | 176,3                           |
| 17                   | РКО-20,0                | Ферросилиций Si75           | 20,00                                                             | 16,8                                           | 53,0                                    | 183,0                           |
| 18                   | РКЗ-21,0                | То же                       | 21,00                                                             | 21,70                                          | 69,0                                    | 182,0                           |
| 19                   | РКЗ-22,5                | Ферросилиций Si25           | 22,50                                                             | 19,8                                           | 60,5                                    | 189,0                           |
| 20                   | РКЗ-27,5/У              | То же                       | 27,5                                                              | 27,4                                           | 79,8                                    | 198,7                           |
| 21                   | РКО-29,0                | Ферросилиций Si65           | 29,0                                                              | 24,5                                           | 72,3                                    | 195,8                           |
| 22                   | РКЗ-40,0/У              | То же                       | 40,0                                                              | 40,0                                           | 106,0                                   | 217,4                           |
| 23                   | РПЗ-63,0/У              | Силикомарганец              | 63,0                                                              | 63,0                                           | 89,9                                    | 233,6                           |
| 24                   | РКЗ-81/УП               | Силикомарганец<br>18 %      | 81,0                                                              | 75,0                                           | 149,5                                   | 290                             |

РУДНОТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

| Эквивалентная проводимость цепи печного контура $Y$ , Ом <sup>-1</sup> | Реактивное сопротивление, $X$ , мОм | Активное сопротивление $R_{\text{пот}}$ , мОм | Мощность, потребляемая из сети $P_c$ , МВт | Потери активной мощности $P_{\text{пот}}$ ( $3I_r^2 + P_{\text{II}}$ ), МВт | Полезная мощность печи $P_{\text{пол}}$ , МВт | Естественный коэффициент мощности $\cos \varphi$ с учетом УПК | Электрический коэффициент полезного действия $\eta_{\text{эл}}$ |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 8                                                                      | 9                                   | 10                                            | 11                                         | 12                                                                          | 13                                            | 14                                                            | 15                                                              |

ные печи

|     |       |       |       |      |       |                       |       |
|-----|-------|-------|-------|------|-------|-----------------------|-------|
| 346 | 7,200 | 1,327 | 4,13  | 0,20 | 3,93  | 0,970                 | 0,952 |
| 450 | 1,065 | 0,173 | 8,76  | 0,81 | 7,95  | 0,876                 | 0,907 |
| 443 | 1,116 | 0,179 | 9,38  | 0,89 | 8,49  | 0,868                 | 0,905 |
| 415 | 1,102 | 0,165 | 9,45  | 0,78 | 8,67  | 0,887                 | 0,916 |
| 516 | 1,173 | 0,244 | 8,15  | 1,32 | 6,83  | 0,796                 | 0,836 |
| 422 | 1,180 | 0,259 | 9,37  | 1,21 | 8,16  | 0,867                 | 0,872 |
| 488 | 1,060 | 0,219 | 11,12 | 1,41 | 9,71  | 0,856                 | 0,870 |
| 562 | 1,020 | 0,169 | 11,05 | 1,30 | 9,75  | 0,818                 | 0,883 |
| 735 | 0,924 | 0,156 | 9,70  | 1,55 | 8,15  | 0,735                 | 0,841 |
| 624 | 0,990 | 0,139 | 15,00 | 1,65 | 13,35 | 0,786                 | 0,885 |
| 529 | 0,990 | 0,138 | 14,35 | 1,29 | 13,11 | 0,852                 | 0,910 |
| 630 | 0,948 | 0,138 | 15,18 | 1,66 | 13,52 | 0,800                 | 0,891 |
| 548 | 1,080 | 0,159 | 14,32 | 1,61 | 12,74 | 0,807                 | 0,888 |
| 494 | 1,070 | 0,159 | 14,83 | 1,38 | 13,45 | 0,858                 | 0,907 |
| 494 | 0,780 | 0,159 | 15,98 | 1,38 | 14,60 | $\frac{0,868}{0,923}$ | 0,911 |
| 543 | 0,921 | 0,191 | 14,62 | 1,78 | 12,84 | 0,866                 | 0,878 |
| 501 | 0,871 | 0,225 | 15,10 | 1,92 | 13,48 | 0,900                 | 0,873 |
| 655 | 0,935 | 0,151 | 17,15 | 2,22 | 14,97 | 0,790                 | 0,871 |
| 554 | 1,069 | 0,150 | 15,95 | 1,65 | 14,30 | 0,805                 | 0,896 |
| 695 | 1,10  | 0,135 | 26,1  | 2,58 | 23,52 | $\frac{0,78}{0,95}$   | 0,901 |
| 639 | 0,709 | 0,180 | 21,83 | 2,82 | 19,00 | 0,891                 | 0,870 |
| 844 | 1,15  | 0,136 | 37,12 | 4,58 | 32,54 | $\frac{0,691}{0,928}$ | 0,877 |
| 385 | 2,00  | 0,20  | 59,0  | 4,85 | 54,15 | $\frac{0,772}{0,938}$ | 0,918 |
| 892 | 0,94  | 0,124 | 41,0  | 8,31 | 32,69 | $\frac{0,546}{0,809}$ | 0,8   |

| 1                   | 2               | 3                       | 4     | 5     | 6     | 7     |
|---------------------|-----------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 25                  | РКЗ-80,0/у      | Ферросилиций            | 80,0  | 80,0  | 171,9 | 268,8 |
| 26                  | РПЗ-80,0/у      | Силикомарганец          | 80,0  | 80,0  | 101,2 | 263,5 |
| <i>Печи карби</i>   |                 |                         |       |       |       |       |
| 1                   | РПО-3,0 К       | Карбид кальция          | 3,0   | 2,68  | 16,5  | 94,0  |
| 2                   | РПО-7,5 К       | То же                   | 7,45  | 6,40  | 28,9  | 128,0 |
| 3                   | РПО-10 К        | »                       | 10,00 | 9,69  | 37,8  | 148,0 |
| 4                   | РПО-15 К        | »                       | 15,00 | 13,20 | 48,0  | 159,0 |
| 5                   | РПО-20 К        | »                       | 20,00 | 16,77 | 50,5  | 192,0 |
| 6                   | РПО-40 К        | »                       | 40,00 | 36,80 | 86,0  | 247,0 |
| 7                   | РПО-40 К        | »                       | 40,00 | 31,88 | 86,0  | 214,0 |
| 8                   | РПО-60 К        | »                       | 60,00 | 45,80 | 103,0 | 257,0 |
| 9                   | РПП-60 К        | »                       | 60,00 | 51,80 | 110,0 | 272,0 |
| 10                  | РПЗ-80 к/у      | »                       | 80,00 | 80,0  | 150,0 | 308,3 |
| 11                  | РКЗ-80 к/у      | »                       | 80,0  | 80,0  | 160,0 | 289,0 |
| <i>Фосфор</i>       |                 |                         |       |       |       |       |
| 1                   | РКЗ-10,5 ф      | Фосфор                  | 10,50 | 6,47  | 17,0  | 220,0 |
| 2                   | РКЗ-13,7 ф      | То же                   | 13,75 | 8,48  | 23,0  | 213,0 |
| 3                   | РКЗ-33 ф        | »                       | 33,00 | 24,60 | 43,0  | 330,0 |
| 4                   | РКЗ-48 ф        | »                       | 50,00 | 50,00 | 62,5  | 463,0 |
| 5                   | РКЗ-50 ф        | »                       | 50,00 | 44,50 | 58,0  | 443,0 |
| 6                   | РКЗ-72 ф (80 ф) | »                       | 80,00 | 72,00 | 78,0  | 533,4 |
| <i>Электрокорун</i> |                 |                         |       |       |       |       |
| 1                   | РКО-1,3 эк      | Циркониевый             | 1,3   | 1,05  | 5,5   | 110   |
| 2                   | РКЗ-1,6 эк      | Хромтитанистый          | 1,6   | 1,56  | 6,0   | 150   |
| 3                   | РКО-1,9 эк      | Циркониевый             | 1,9   | 1,50  | 5,5   | 158   |
| 4                   | РКЗ-4,5 эк      | Хромтитанистый          | 4,5   | 3,38  | 8,8   | 222   |
| 5                   | РКЗ-5,5 эк      | Белый                   | 5,5   | 4,21  | 10,3  | 236   |
| 6                   | РКЗ-6,6 эк      | То же                   | 6,6   | 5,10  | 11,3  | 261   |
| 7                   | РКО-10 эк       | Нормальный              | 10,5  | 9,07  | 25,7  | 204   |
| 8                   | РКО-16,5 эк     | То же                   | 16,5  | 14,87 | 39,6  | 217   |
| <i>Печи цветной</i> |                 |                         |       |       |       |       |
| 1                   | РКЗ-4,5 ц       | Свинец-цинк             | 4,5   | 4,5   | 14,5  | 178   |
| 2                   | РКЗ-5,0 ц       | Титанистый шлак         | 5,0   | 4,28  | 18,5  | 133,5 |
| 3                   | РКО-7,9 ц       | Монооксид никеля        | 9,0   | 5,64  | 16,35 | 199,5 |
| 4                   | РКЗ-10,5 ц      | Титанистый шлак         | 10,5  | 10,5  | 38,5  | 158   |
| 5                   | РПЗ-12 ц        | Медноникелевый<br>штейн | 12,0  | 12,0  | 15,4  | 260   |
| 6                   | РПЗ-20 ц        | То же                   | 20,0  | 16,08 | 28,4  | 327   |
| 7                   | РПЗ-30 ц        | » »                     | 30,0  | 28,9  | 29,5  | 566   |
| 8                   | РПЗ-33 шц       | Медный штейн            | 33,0  | 26,6  | 29,0  | 305   |

| 8                  | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14                    | 15    |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|
| 1106               | 1,22  | 0,09  | 74,16 | 7,98  | 66,18 | $\frac{0,564}{0,927}$ | 0,892 |
| 384                | 2,00  | 0,222 | 73,60 | 6,82  | 66,78 | $\frac{0,768}{0,920}$ | 0,907 |
| <i>да кальция</i>  |       |       |       |       |       |                       |       |
| 303                | 1,377 | 0,369 | 2,45  | 0,30  | 2,15  | 0,911                 | 0,878 |
| 390                | 0,940 | 0,245 | 5,95  | 0,65  | 5,30  | 0,930                 | 0,891 |
| 442                | 1,386 | 0,260 | 7,66  | 1,14  | 6,52  | 0,790                 | 0,850 |
| 529                | 1,240 | 0,241 | 10,06 | 1,71  | 8,35  | 0,762                 | 0,830 |
| 455                | 1,347 | 0,225 | 13,24 | 1,75  | 11,49 | 0,790                 | 0,83  |
| 602                | 0,773 | 0,113 | 32,60 | 2,60  | 30,00 | 0,886                 | 0,920 |
| 696                | 0,683 | 0,119 | 28,05 | 2,73  | 25,32 | 0,880                 | 0,903 |
| 693                | 0,727 | 0,109 | 39,57 | 3,47  | 36,02 | 0,864                 | 0,910 |
| 700                | 0,690 | 0,077 | 45,40 | 2,87  | 42,53 | 0,876                 | 0,937 |
| 842                | 0,85  | 0,08  | 73,60 | 5,40  | 68,20 | $\frac{0,789}{0,92}$  | 0,927 |
| 888                | 1,08  | 0,078 | 73,60 | 5,99  | 67,61 | $\frac{0,664}{0,920}$ | 0,919 |
| <i>ные печи</i>    |       |       |       |       |       |                       |       |
| 134                | 1,950 | 0,312 | 6,23  | 0,30  | 5,93  | 0,965                 | 0,952 |
| 186                | 1,652 | 0,143 | 8,08  | 0,28  | 7,80  | 0,952                 | 0,965 |
| 226                | 1,198 | 0,120 | 23,69 | 0,72  | 22,97 | 0,963                 | 0,970 |
| 233                | 1,200 | 0,108 | 48,15 | 1,30  | 46,85 | 0,960                 | 0,973 |
| 227                | 1,270 | 0,090 | 42,60 | 0,93  | 41,67 | 0,957                 | 0,978 |
| 253                | 1,55  | 0,108 | 60,93 | 1,97  | 58,96 | 0,846                 | 0,977 |
| <i>довые печи</i>  |       |       |       |       |       |                       |       |
| 86,5               | 4,45  | 0,596 | 0,97  | 0,06  | 0,91  | 0,923                 | 0,938 |
| 69,2               | 4,95  | 0,599 | 1,47  | 0,07  | 1,40  | 0,940                 | 0,952 |
| 60,2               | 5,79  | 0,596 | 1,41  | 0,06  | 1,35  | 0,937                 | 0,957 |
| 68,6               | 4,51  | 0,466 | 3,21  | 0,11  | 3,10  | 0,951                 | 0,966 |
| 75,5               | 3,10  | 0,431 | 4,09  | 0,15  | 3,94  | 0,972                 | 0,963 |
| 74,9               | 3,95  | 0,480 | 4,87  | 0,20  | 4,64  | 0,955                 | 0,959 |
| 218,0              | 1,41  | 0,169 | 8,62  | 0,36  | 8,26  | 0,951                 | 0,958 |
| 315,7              | 1,35  | 0,225 | 13,46 | 1,07  | 12,39 | 0,905                 | 0,921 |
| <i>металлургии</i> |       |       |       |       |       |                       |       |
| 142                | 1,52  | 0,197 | 4,40  | 0,130 | 4,27  | 0,976                 | 0,971 |
| 240                | 1,95  | 0,544 | 3,78  | 0,560 | 3,22  | 0,883                 | 0,852 |
| 142,0              | 3,97  | 0,708 | 4,66  | 0,600 | 4,06  | 0,826                 | 0,871 |
| 423,0              | 1,24  | 0,280 | 8,91  | 1,25  | 7,66  | 0,850                 | 0,860 |
| 59,0               | 1,73  | 0,416 | 11,3  | 0,30  | 11,0  | 0,945                 | 0,975 |
| 150,4              | 2,60  | 0,300 | 14,79 | 0,73  | 14,06 | 0,920                 | 0,950 |
| 90                 | 3,71  | 0,690 | 27,2  | 1,8   | 25,4  | 0,940                 | 0,931 |
| 95                 | 3,30  | 0,475 | 25,3  | 1,2   | 24,1  | 0,950                 | 0,955 |



| №№ п/п     | Тип печной установки | Наименование продукта | Полная мощность, МВ·А | Ток в электроде, кА | Линейное напряжение, В | Мощность потребления из сети, МВт |
|------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|-----------------------------------|
|            |                      |                       | S                     | I <sub>p</sub>      | U <sub>p</sub>         | P <sub>с.ср</sub>                 |
| Ферросплав |                      |                       |                       |                     |                        |                                   |
| 1          | РКЗ-16,5/у           | Силикомарганец        | 17,3                  | 53,4                | 187,4                  | 16,00                             |
| 2          | РКЗ-27,5/у           | Ферросилиций 45       | 27,4                  | 79,8                | 198,7                  | 26,10                             |
| 3          | РКЗ-40,0/у           | Ферросилиций 65       | 40,0                  | 106,0               | 217,4                  | 37,12                             |
| 4          | РПЗ-63,0/у           | Силикомарганец        | 63,0                  | 89,9                | 233,6                  | 59,0                              |
| 5          | РКЗ-81/УП*           | »                     | 75,0                  | 149,5               | 290,0                  | 41,00                             |
| 6          | РКЗ-80,0/у           | Ферросилиций          | 80,0                  | 171,9               | 268,8                  | 74,16                             |
| 7          | РПЗ-80,0/у           | Силикомарганец        | 80,0                  | 101,2               | 263,5                  | 73,60                             |
| Карбид     |                      |                       |                       |                     |                        |                                   |
| 1          | РПЗ-80к/у            | Карбид кальция        | 80,0                  | 150,0               | 308,3                  | 73,60                             |
| 2          | РКЗ-80к/у            | »                     | 80,0                  | 160,0               | 289,0                  | 73,60                             |

\* Эта печная установка имеет поперечную компенсацию, включенную в установки продольной компенсации реактивной мощности.

и параметры мощных руднотермических печей с искусственной компенсацией реактивной мощности. Все печи, за исключением печи № 5, оборудованы установками продольной компенсации, на практике показавшие свою работоспособность. Печь № 5 имеет поперечную компенсацию, включенную в четвертую обмотку печного трансформатора. Печи, оборудованные установками продольно-емкостной компенсации, являются отечественными, а печь № 5 — импортная.

Из табл. 3.9 видно, что у всех руднотермических печей естественный коэффициент мощности является достаточно низким и лежит в пределах 0,55—0,87 в зависимости от мощности печи. Из таблицы также видно, что с помощью искусственной компенсации реактивной мощности (продольной или поперечной) коэффициент мощности руднотермических печей доведен до величин  $\cos \varphi = 0,92—0,95$ . Здесь же приведены значения мощности конденсаторных батарей, необходимых для доведения  $\cos \varphi$  до указанных величин.

| Реактивное сопротивление |                       |          | Мощность конденсаторной батареи, МВар |           | Средние параметры без УПК |                                   | Коэффициент мощности с компенсацией при $I_p$ |
|--------------------------|-----------------------|----------|---------------------------------------|-----------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------|
| естественное, мОм        | компенсированное, мОм | УПК, мОм |                                       |           | полная мощность, МВ·А     | естественный коэффициент мощности |                                               |
| $x_y$                    | $x_k = x_y - x_c$     | $x_c$    | $Q_{ср}$                              | $Q_{max}$ | $S_e$                     | $\cos \varphi_e$                  | $\cos \varphi$                                |

ные печи

|      |       |       |       |       |        |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 1,07 | 0,778 | 0,292 | 2,50  | 3,15  | 18,43  | 0,868 | 0,923 |
| 1,10 | 0,450 | 0,650 | 12,36 | 18,61 | 33,46  | 0,780 | 0,95  |
| 1,15 | 0,441 | 0,709 | 23,90 | 25,52 | 53,72  | 0,691 | 0,928 |
| 2,00 | 0,900 | 1,100 | 26,80 | 41,23 | 76,43  | 0,772 | 0,938 |
| 0,94 | —     | —     | 33,00 | 54,00 | 75,00  | 0,546 | 0,809 |
| 1,22 | 0,337 | 0,883 | 78,45 | 90,65 | 131,39 | 0,564 | 0,927 |
| 2,00 | 1,021 | 0,979 | 30,08 | 57,98 | 95,83  | 0,768 | 0,920 |

ные печи

|      |       |       |       |       |        |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 0,85 | 0,466 | 0,384 | 25,92 | 29,78 | 92,28  | 0,789 | 0,920 |
| 1,08 | 0,410 | 0,670 | 51,46 | 56,73 | 110,84 | 0,664 | 0,920 |

четвертую обмотку печного трансформатора, остальные печи оборудованы

В табл. 3.9 приведены значения реактивных сопротивлений печных установок естественных (без компенсации реактивной мощности) и после установок батарей искусственной компенсации. Следует отметить, что при применении искусственной компенсации реактивной мощности значительно возрастают токи в электродах, что видно из табл. 3.9, достигая достаточно больших величин.

## 6. Электрические параметры дуговых сталеплавильных печей

Основные типы дуговых сталеплавильных печей СССР приведены в табл. 3.10. Помимо этих печей на заводах отечественной металлургии и в литейных цехах машиностроительных заводов эксплуатируется ряд устаревших конструкций ДСП различной вместимости (электропечи малой емкости с загрузкой через рабочее окно и электропечи серии ДСВ с выкатывающейся ванной номинальной вместимостью от 5 до 40 т).

## ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВОК ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ДСП

| Тип печи    | Параметры трансформатора на высшей ступени вторичного напряжения |               |         |                               |                                 | Вторичный токопровод |        | Вся установка печи |        |
|-------------|------------------------------------------------------------------|---------------|---------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------|--------|--------------------|--------|
|             | Мощность, МВ·А                                                   | Напряжение, В | Ток, кА | Активное сопротивление R, МОм | Реактивное сопротивление X, МОм | R, МОм               | X, МОм | R, МОм             | X, МОм |
| ДСП-0,5     | 0,63                                                             | 216           | 1,68    | 2,10                          | 24,2                            | 3,75                 | 2,25   | 5,85               | 26,45  |
| ДСП-1,5     | 1,0                                                              | 225           | 2,57    | 1,03                          | 16,7                            | 1,33                 | 3,45   | 2,36               | 20,15  |
| ДСП-3       | 1,8                                                              | 242           | 4,25    | 0,52                          | 8,15                            | 0,94                 | 0,99   | 1,46               | 9,14   |
| ДСП-3       | 2,0                                                              | 243           | 4,8     | 0,40                          | 8,44                            | 1,68                 | 1,26   | 2,08               | 9,70   |
| ДС-5МТ      | 2,8                                                              | 257           | 6,3     | 0,38                          | 4,62                            | 0,86                 | 1,23   | 1,24               | 5,85   |
| ДС-5МТ      | 4,0                                                              | 281           | 8,22    | 0,26                          | 4,08                            | 0,86                 | 1,23   | 1,12               | 5,31   |
| ДСВ-20      | 9,0                                                              | 270           | 19,25   | 0,10                          | 1,34                            | 0,60                 | 1,71   | 0,70               | 3,05   |
| ДСП-25      | 9,0                                                              | 318           | 16,35   | 0,14                          | 1,63                            | 0,64                 | 2,51   | 0,78               | 4,14   |
| ДСВ-40      | 15,0                                                             | 368           | 23,5    | 0,084                         | 0,77                            | 0,553                | 2,52   | 0,637              | 3,29   |
| ДСП-100     | 25,0                                                             | 417           | 34,6    | 0,06                          | 0,50                            | 0,515                | 2,75   | 0,575              | 3,35   |
| ДСП-100     | 29,15                                                            | 486           | 34,6    | 0,065                         | 0,73                            | 0,515                | 2,37   | 0,58               | 3,10   |
| ДСП-100-НЗА | 50                                                               | 573           | 50,5    | 0,05                          | 0,35                            | 0,25                 | 3,15   | 0,30               | 3,50   |
| ДСП-100-И6  | 80                                                               | 761           | 60,7    | 0,05                          | 0,39                            | 0,23                 | 3,80   | 0,28               | 4,19   |
| ДСП-200     | 45                                                               | 591,5         | 43,9    | 0,069                         | 0,89                            | 0,581                | 3,71   | 0,65               | 4,60   |
| ДСП-200     | 60                                                               | 695           | 50,0    | 0,072                         | 0,94                            | 0,56                 | 3,56   | 0,632              | 4,50   |

Кроме того в последние годы на Оскольском электрометаллургическом комбинате пущены четыре ДСП вместимостью по 150 т с трансформаторами мощностью 80/90 МВ·А, поставленные западногерманской фирмой «Крупп», и на Белорусском металлургическом заводе две ДСП вместимостью 100 т с трансформаторами мощностью 75 МВ·А, поставленные австрийской фирмой «Фест-Альпине».

В СССР введено в эксплуатацию значительное количество сверхмощных печей ДСП-100НЗА по конструктивной схеме, аналогичной 100-т печам, выпускавшимся в 1958—1970 гг., но с гидравлическими приводами основных механизмов взамен электромеханических. С 1982 г. взамен печей ДСП-100НЗА выпускались печи ДСП-100И6 с механизмом подъема и отворота свода на отдельном от люльки печи основании.

Вторичный токопровод ДСП вместимостью 0,5 т выполнен по схеме «треугольник внутри трансформатора».

ТАБЛИЦА 3.11

СОПРОТИВЛЕНИЕ УЧАСТКОВ КОРОТКОЙ СЕТИ ДСП  
ВМЕСТИМОСТЬЮ 50 т

| Участок печи  | Реактивное сопротивление |       | Активное сопротивление |       |
|---------------|--------------------------|-------|------------------------|-------|
|               | мОм                      | %     | мОм                    | %     |
| Шинный пакет  | 0,29                     | 9,3   | 0,040                  | 6,6   |
| Гибкие кабели | 1,09                     | 34,9  | 0,034                  | 5,6   |
| Трубошины     | 1,06                     | 34,0  | 0,030                  | 5,0   |
| Электроды     | 0,68                     | 21,8  | 0,5                    | 82,8  |
| Итого         | 3,12                     | 100,0 | 0,604                  | 100,0 |

Эта схема является по ряду показателей наиболее перспективной и для остальных ДСП; поэтому по мере последующих модернизаций печей различных размеров следует ожидать широкого ее внедрения.

Печи вместимостью 1,5—6 т имеют вторичные токопроводы по схеме «треугольник на неподвижных башмаках» с копланарным расположением гибких кабелей и трубошин разных фаз. На печах ДСП-100НЗА и ДСП-100И6 токопроводы выполнены по такой же схеме, но с триангулированным расположением кабельных гирлянд, а также трубошин на рукавах электрододержателей.

В таблице 3.11 в качестве примера приведено распределение реактивных и активных сопротивлений по участкам короткой сети ДСП вместимостью 50 т.

Основные технические данные трансформаторов для питания ДСП приведены в табл. 3.12. Трансформаторы номинальной мощностью до 8 МВ·А включительно выпускаются с переключением ступеней вторичного напряжения с отключением от сети (ПБВ — переключение без возбуждения), а более мощные (12,5 МВ·А и более) — с переключением под нагрузкой (РПН-регулирование под нагрузкой).

В табл. 3.13 приведены характеристики вторичных токопроводов ДСП по участкам. В ряде случаев соответственно конкретным местным условиям конструктивные решения отдельных участков токопроводов могут изменяться (особенно это относится к печам малой вместимости, для которых размещение печных подстанций часто отличается от типовых решений). Удлинение вторичного токопровода на участке от выводов печного

| Тип печи    | Тип трансформатора           | Мощность, МВ·А |              | Первичное напряжение, кВ |
|-------------|------------------------------|----------------|--------------|--------------------------|
|             |                              | номинальная    | максимальная |                          |
| ДСП-0,5     | ЭТПК-1000/10-70УЗ            | 0,63           | —            | 6 или 10                 |
| ДСП-1,5     | ЭТПК-2000/10-71УЗ            | 1,25           | —            | »                        |
| ДСП-3       | ЭТПК-3200/10-71УЗ            | 2,0            | —            | »                        |
| ДСП-3       | ЭТДЦП-4000/10                | 2,5            | —            | »                        |
| ДСП-6       | ЭТЦПК (ЭТЦДПК)-6300/10-72УЗ  | 4,0            | 4,8          | »                        |
| ДСП-12      | ЭТЦПК-12500/10-74УЗ          | 8,0            | 9,6          | 6 или 10                 |
| ДСП-25      | ЭТЦНК-20000/35-76УЗ          | 12,5           | 15           | 10 или 35                |
| ДСП-50      | ЭТЦН-32000/35-71УЗ           | 20,0           | 24           | 35                       |
| ДСП-100     | ЭТЦНК-40000/35               | 25             | —            | 35                       |
| и ДСП-50    | ЭТЦН-52000/35                | 32             | 38,4         | 35                       |
| и ДСП-100   |                              |                |              |                          |
| ДСП-100-НЗА | ЭТЦ-63000/35 + АТЦН-63000/35 | 50             | 63           | 35                       |
| ДСП-100И6   | ЭТЦНД-160000/35-82УХЛ4       | 80             | 90           | 35                       |

Примечание: Вторичный ток со знаком \* соответствует ступеням

трансформатора до неподвижных башмаков для печей малой емкости (до 6 т включительно) не приводит к заметному ухудшению основных эксплуатационных показателей печей (производительности и удельного расхода электроэнергии). Однако помимо дополнительного расхода цветного металла на ошиновку, при этом необходимо принять меры против возможных коротких замыканий в ошиновке значительной протяженности. Особенно опасны в этом отношении длинные вертикальные участки шинных пакетов.

В зависимости от соотношения параметров вторичного токопровода и печного трансформатора может быть обеспечен тот или иной электрический режим работы установки печи, который характеризуется величинами активной мощности, вторичного напряжения, рабочего тока и коэффициента мощности.

Исходными данными для расчета основных параметров электрического режима печной установки являются: индуктивное сопротивление печного контура (вторично-

| Пределы вторичного напряжения, В | Вторичный линейный ток, кА | Напряжение короткого замыкания, %<br>(в том числе реактора) | Потери, кВт         |                             | Переключе-<br>ние ступеней<br>НН |
|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------|----------------------------------|
|                                  |                            |                                                             | холосто-<br>го хода | короткого<br>замыка-<br>ния |                                  |
| 216—106                          | 1,68                       | 32,4 (26,0)                                                 | 2,8                 | 15,0                        | ПБВ                              |
| 225—110                          | 3,20                       | 31,5 (25,0)                                                 | 4,2                 | 23,0                        | »                                |
| 243—124                          | 4,80                       | 27,5 (20,0)                                                 | 7,0                 | 28,0                        | »                                |
| 230,8—182,4*                     | 6,25/7,91                  | 47,3 (34)                                                   | —                   | —                           | »                                |
| —105,3                           |                            |                                                             |                     |                             |                                  |
| 281—130                          | 8,22+20 %                  | 20,7 (10)                                                   | 10                  | 48                          | »                                |
| 318—120                          | 14,5+20 %                  | 14,01                                                       | 20,5                | 75                          | »                                |
| 370—128                          | 19,5+20 %                  | 6,5                                                         | 30,5                | 150                         | РПН                              |
| 407—144                          | 28,4+20 %                  | 9,6                                                         | 35                  | 150                         | »                                |
| 417—131                          | 34,6                       | 7,6                                                         | 85,6                | 217                         | »                                |
| 478—162                          | 38,8+20 %                  | 38,0                                                        | 48                  | 214                         | »                                |
| 573—203                          | 50+26 %                    | 4,0                                                         | 118                 | 350                         | »                                |
| 761—654*—259                     | 70,6/79,5*                 | 5,0                                                         | 145                 | 400                         | »                                |

напряжения со знаком \* и ниже.

го токопровода и трансформатора)  $X_k$ , мОм; вторичное напряжение печного трансформатора  $U_2$ , В; рабочий ток  $I$ , кА.

Индуктивным сопротивлением  $X_k$  практически определяется полное сопротивление короткого замыкания печного контура  $Z_k = \sqrt{X_k^2 + R_k^2}$ , поскольку в реальных условиях  $X_k \gg R_k$ .

Соответственно ток короткого замыкания печной установки равен

$$I_k = U_{2\phi} / Z_k \approx U_{2\phi} / X_k,$$

где  $U_{2\phi}$  — фазное вторичное напряжение электропечного трансформатора.

Во избежание серьезных погрешностей в расчетах и в оценке режимов работы дуговых печей следует учитывать существенное различие индуктивных сопротивлений печного контура в режиме короткого замыкания  $X_k$  и в эксплуатационном режиме  $X_\Sigma$ .

В процессе горения дуги имеют место искажения си-

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ВТОРИЧНЫХ ТОКОПРОВОДОВ ДСП

| Тип печи    | Вторичный ток<br>$I_{\text{ном}}, \text{кА}$ | Шинный мост     |                   |                                |                                   | Гибкие кабели |                       |                                |                                   | Трубошины   |                   |                                |                                   | Электроды   |                                   |
|-------------|----------------------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------|-----------------------------------|
|             |                                              | сечение шин, мм | число шин на фазу | общее сечение, мм <sup>2</sup> | плотность тока, А/мм <sup>2</sup> | тип кабеля    | число кабелей на фазу | общее сечение, мм <sup>2</sup> | плотность тока, А/мм <sup>2</sup> | диаметр, мм | число шин на фазу | общее сечение, мм <sup>2</sup> | плотность тока, А/мм <sup>2</sup> | диаметр, мм | плотность тока, А/см <sup>2</sup> |
| ДСП-0,5     | 1,2                                          | 80×10           | 1                 | 800                            | 1,50                              | МГЭ-300       | 3                     | 900                            | 1,33                              | 28/32       | 2                 | 540                            | 2,22                              | 150         | 6,8                               |
| ДСП-1,5     | 2,67                                         | 120×10          | 2                 | 2400                           | 1,08                              | МГЭ-500       | 4                     | 2000                           | 1,28                              | 36/22       | 2                 | 1280                           | 2,00                              | 150         | 14,6                              |
| ДСП-3       | 4,25                                         | 120×10          | 4                 | 4800                           | 0,89                              | »             | 6                     | 3000                           | 1,42                              | 40/23       | 2                 | 1680                           | 2,53                              | 200         | 13,5                              |
| ДС-6Н1      | 6,30                                         | 120×10          | 4                 | 4800                           | 1,31                              | »             | 12                    | 6000                           | 1,05                              | 60/40       | 2                 | 3140                           | 2,00                              | 300         | 8,9                               |
| ДСП-12      | 10,4                                         | 250×12          | 2                 | 6000                           | 1,00                              | »             | 4                     | 2000                           | 3,00                              | 60/40       | 1                 | 1570                           | 3,82                              | 350         | 10,8                              |
| ДСП-25      | 16,35                                        | 300×10          | 2                 | 6000                           | 1,57                              | »             | 6                     | 3000                           | 3,15                              | 80/60       | 1                 | 2200                           | 4,30                              | 400         | 13,0                              |
| ДСП-50      | 23,55                                        | 300×10          | 3                 | 9000                           | 1,51                              | »             | 8                     | 4000                           | 3,40                              | 60/40       | 2                 | 3140                           | 4,33                              | 500         | 12,0                              |
| ДСП-100     | 34,6                                         | 300×12          | 4                 | 14400                          | 1,39                              | МГЭ-500       | 16                    | 8000                           | 2,50                              | 60/40       | 3                 | 4710                           | 4,25                              | 550         | 14,6                              |
| ДСП-100-НЗА | 50,0                                         | *               | 4                 | 26960                          | 1,07                              | КСВ-2100      | 6                     | 12600                          | 3,97                              | 200/170     | 2                 | 17400                          | 2,87                              | 610         | 17,1                              |
| ДСП-100-И6  | 57,0                                         | ∅200/170        | 1                 | 8700                           | 3,76                              | КСВ-4000      | 4                     | 16000                          | 3,56                              | 200/170     | 2                 | 17400                          | 3,27                              | 610         | 19,5                              |
| ДСП-200     | 50,0                                         | 360×12          | 4                 | 17280                          | 1,47                              | МГЭ-1000      | 8                     | 8000                           | 3,15                              | 60/30       | 5                 | 10620                          | 2,39                              | 610         | 15,0                              |

\* Комбинированная шина из двух труб ∅ 50/30, между которыми сварена медная полоса сечением 300×12.

нусондальной формы кривых тока и напряжения, причем степень этих искажений существенно зависит от коэффициента мощности установки печи и прогрессивно увеличивается по мере его роста.

Выражение для коэффициента мощности печной установки в эксплуатационном режиме ее работы имеет вид:

$$\cos \varphi_3 = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_3} = \sqrt{1 - (IX_3/U_{2\phi})^2}.$$

Если величина  $X_k$  может быть определена расчетами или получена измерениями из опытов короткого замыкания, то величина  $X_3$  может быть достоверно определена косвенным путем по измерениям активной и реактивной энергии в режиме горения дуги. Для определения  $X_3$  по  $X_k$  необходимо иметь полученную на основании опытных данных зависимость  $X_3/X_k = K_3 = f(\cos \varphi_3)$ .

При наличии такой зависимости определение  $X_3$  может производиться методом последовательного приближения следующим образом.

1. Задаются  $K'_3$ , например,  $K'_3 = 1,1$  и находят коэффициент мощности

$$\cos \varphi'_3 = \sqrt{1 - (I_2 X_k K'_3 / U_{2\phi})^2}.$$

2. Для полученного значения  $\cos \varphi'_3$  определяют по имеющейся зависимости  $K_3 = f(\cos \varphi)$ , значение  $K_{31}$  и сравнивают его с  $K'_3$ . Если  $K_{31}$  существенно отличается от  $K'_3$ , повторно задаются  $K''_3$ , определяют  $X''_3 = X_k K''_3$ , находят  $\cos \varphi''_3$ ,  $K_{32}$  и сравнивают последнюю величину с  $K''_3$ . Приближение считают достаточным, если  $K_{31}$  или  $K_{32}$  отличается от  $K'_3$  или  $K''_3$  менее, чем на 1 %.

До получения более обоснованных опытных данных для практических расчетов может быть использована зависимость  $K_3 = f(\cos \varphi)$

|                          |      |      |      |      |      |
|--------------------------|------|------|------|------|------|
| $\cos \varphi$ . . . . . | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 | 0,70 |
| $K_3$ . . . . .          | 1,05 | 1,06 | 1,08 | 1,11 | 1,16 |

*Продолжение*

|                          |      |      |      |      |      |
|--------------------------|------|------|------|------|------|
| $\cos \varphi$ . . . . . | 0,75 | 0,80 | 0,85 | 0,90 | 0,95 |
| $K_3$ . . . . .          | 1,24 | 1,35 | 1,50 | 1,70 | 1,95 |

Пример. Определить  $X_3$  при  $X_k = 3,8$  мОм для рабочего тока  $I = 60$  кА и фазного вторичного напряжения  $U = 440$  В.  $\cos \varphi_3 = 0,76$ .

Решение. Задаемся  $K'_3 = 1,2$  и определяем  $\cos \varphi' = \sqrt{1 - (60 \times 3,8 \cdot 1,2 / 440)^2} = 0,78$ , чему по вышеприведенной зависимости соот-



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ НЕКОТОРЫХ ДСП РАЗЛИЧНОЙ ВМЕСТИМОСТИ (ДАННЫЕ ЦЕНТРОЭНЕРГОЦЕНТРА) )

| Тип печи,<br>мощность | Периоды плавки<br>(напряжение в период<br>расплавления) | Потребление<br>электроэнергии |                            | Длительность, ч - мин |         |                | Средние значения за период |           |            |       |
|-----------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|---------|----------------|----------------------------|-----------|------------|-------|
|                       |                                                         | активной<br>кВт·ч             | реак-<br>тивной,<br>квар·ч | под<br>током          | простой | весь<br>период | S<br>МВ·А                  | P,<br>МВт | Q,<br>Мвар | cos φ |
| ДС-5МТ,<br>2,8 МВ·А   | Расплавление<br>(200В)                                  | 1 942                         | 1 470                      | 1—05                  | —       | 1—05           | 2,25                       | 1,79      | 1,36       | 0,80  |
|                       | Окисление                                               | 296                           | 140                        | 0—20                  | 0—25    | 0—45           | 0,98                       | 0,89      | 0,42       | 0,90  |
|                       | Рафинировка                                             | 685                           | 228                        | 0—55                  | —       | 0—55           | 0,78                       | 0,74      | 0,25       | 0,95  |
|                       | Вся плавка                                              | 2 923                         | 1 838                      | 2—20                  | 0—25    | 2—45           | 1,48                       | 1,25      | 0,79       | 0,85  |
| ДСВ-10,<br>5 МВ·А     | Расплавление<br>(200В)                                  | 4 802                         | 3 990                      | 1—38                  | 1—03    | 2—41           | 3,82                       | 2,94      | 2,44       | 0,770 |
|                       | Окисление                                               | 406                           | 280                        | 0—13                  | 0—09    | 0—22           | 2,27                       | 1,87      | 1,29       | 0,824 |
|                       | Рафинировка                                             | 2 072                         | 770                        | 1—19                  | 0—07    | 1—26           | 1,68                       | 1,57      | 0,58       | 0,937 |
|                       | Вся плавка                                              | 7 280                         | 5 040                      | 3—10                  | 1—19    | 4—29           | 2,96                       | 2,43      | 1,69       | 0,822 |
| ДСВ-20, 9 МВ·А        | Расплавление<br>(270В)                                  | 7 314                         | 5 565                      | 0—55                  | —       | 0—55           | 10,02                      | 7,98      | 6,07       | 0,796 |
|                       | Расплавление<br>(180В)                                  | 636                           | 318                        | 0—10                  | —       | 0—10           | 4,27                       | 3,82      | 1,91       | 0,894 |
|                       | Окисление                                               | 1 749                         | 795                        | 0—30                  | 0—45    | 1—15           | 3,84                       | 3,50      | 1,59       | 0,910 |
|                       | Рафинировка                                             | 2 067                         | 795                        | 1—05                  | —       | 1—05           | 2,04                       | 1,91      | 0,73       | 0,934 |
| ДСП-100,<br>25 МВ·А   | Вся плавка                                              | 11 766                        | 7 473                      | 2—40                  | 0—45    | 3—25           | 5,22                       | 4,41      | 2,80       | 0,844 |
|                       | Расплавление<br>(417В)                                  | 35 700                        | 31 080                     | 2—00                  | 0—35    | 2—35           | 23,67                      | 17,85     | 15,54      | 0,755 |

|                            |                        |         |         |      |      |      |       |       |       |       |
|----------------------------|------------------------|---------|---------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| ДСП-100-НЗА,<br>50/63 МВ·А | Расплавление<br>(365В) | 6 300   | 5 040   | 0—30 | —    | 0—30 | 16,14 | 12,60 | 10,08 | 0,781 |
|                            | Окисление              | 9 240   | 7 980   | 0—35 | 0—35 | 1—10 | 20,73 | 15,84 | 13,68 | 0,764 |
|                            | Рафинировка            | 7 560   | 5 140   | 1—10 | —    | 1—10 | 7,78  | 6,48  | 4,39  | 0,833 |
|                            | Вся плавка             | 58 800  | 49 140  | 4—15 | 1—10 | 5—25 | 18,03 | 13,84 | 11,66 | 0,768 |
|                            | Расплавление           | 46 200  | 44 800  | 1—20 | 0—25 | 1—45 | 48,25 | 34,70 | 33,60 | 0,72  |
|                            | Окисление              | 11 200  | 11 900  | 1—05 | —    | 1—05 | 15,10 | 10,35 | 11,00 | 0,685 |
|                            | Рафинировка            | 4 200   | 4 900   | 0—20 | —    | 0—20 | 19,40 | 12,60 | 14,70 | 0,65  |
|                            | Вся плавка             | 61 600  | 61 600  | 2—45 | 0—25 | 3—10 | 31,70 | 22,40 | 22,40 | 0,707 |
|                            | Расплавление           | 80 400  | 75 600  | 3—06 | 1—01 | 4—07 | 35,70 | 25,90 | 24,40 | 0,725 |
|                            | Окисление              | 15 300  | 14 200  | 0—40 | 0—18 | 0—58 | 31,40 | 22,90 | 21,40 | 0,730 |
| ДСП-200,<br>45 МВ·А        | Рафинировка            | 15 500  | 13 900  | 1—05 | 0—21 | 1—26 | 19,20 | 14,30 | 12,80 | 0,750 |
|                            | Вся плавка             | 111 200 | 103 700 | 4—51 | 1—40 | 6—31 | 31,20 | 22,70 | 21,20 | 0,730 |
|                            | Расплавление<br>(650В) | 77 700  | 7 100   | 2—20 | 1—10 | 3—30 | 44,85 | 33,0  | 30,4  | 0,735 |
|                            | Окисление              | 27 000  | 26 500  | 1—05 | 0—25 | 1—30 | 34,95 | 24,9  | 24,5  | 0,71  |
|                            | Рафинировка            | 16 200  | 15 000  | 1—00 | 0—15 | 1—15 | 22,10 | 16,2  | 15,0  | 0,735 |
|                            | Вся плавка             | 123 000 | 114 000 | 4—25 | 1—50 | 6—15 | 38,10 | 27,9  | 25,9  | 0,73  |
|                            | Расплавление<br>(695В) | 82 300  | 70 250  | 2—44 | 0—54 | 3—38 | 39,50 | 30,1  | 25,7  | 0,765 |
|                            | Окисление              | 18 700  | 17 200  | 1—00 | —    | 1—00 | 25,40 | 18,7  | 17,2  | 0,735 |
|                            | Рафинировка            | 15 700  | 13 950  | 1—05 | 0—12 | 1—17 | 19,35 | 14,5  | 12,9  | 0,75  |
|                            | Вся плавка             | 116 700 | 101 400 | 4—49 | 1—06 | 5—55 | 32,00 | 24,2  | 21,0  | 0,757 |
| ДСП-200,<br>60 МВ·А        | Расплавление<br>(650В) | 77 700  | 7 100   | 2—20 | 1—10 | 3—30 | 44,85 | 33,0  | 30,4  | 0,735 |
|                            | Окисление              | 27 000  | 26 500  | 1—05 | 0—25 | 1—30 | 34,95 | 24,9  | 24,5  | 0,71  |
|                            | Рафинировка            | 16 200  | 15 000  | 1—00 | 0—15 | 1—15 | 22,10 | 16,2  | 15,0  | 0,735 |
|                            | Вся плавка             | 123 000 | 114 000 | 4—25 | 1—50 | 6—15 | 38,10 | 27,9  | 25,9  | 0,73  |
|                            | Расплавление<br>(695В) | 82 300  | 70 250  | 2—44 | 0—54 | 3—38 | 39,50 | 30,1  | 25,7  | 0,765 |
|                            | Окисление              | 18 700  | 17 200  | 1—00 | —    | 1—00 | 25,40 | 18,7  | 17,2  | 0,735 |
|                            | Рафинировка            | 15 700  | 13 950  | 1—05 | 0—12 | 1—17 | 19,35 | 14,5  | 12,9  | 0,75  |
|                            | Вся плавка             | 116 700 | 101 400 | 4—49 | 1—06 | 5—55 | 32,00 | 24,2  | 21,0  | 0,757 |
|                            | Расплавление<br>(650В) | 77 700  | 7 100   | 2—20 | 1—10 | 3—30 | 44,85 | 33,0  | 30,4  | 0,735 |
|                            | Окисление              | 27 000  | 26 500  | 1—05 | 0—25 | 1—30 | 34,95 | 24,9  | 24,5  | 0,71  |
| ДСП-200,<br>60 МВ·А        | Расплавление<br>(650В) | 77 700  | 7 100   | 2—20 | 1—10 | 3—30 | 44,85 | 33,0  | 30,4  | 0,735 |
|                            | Окисление              | 27 000  | 26 500  | 1—05 | 0—25 | 1—30 | 34,95 | 24,9  | 24,5  | 0,71  |
|                            | Рафинировка            | 16 200  | 15 000  | 1—00 | 0—15 | 1—15 | 22,10 | 16,2  | 15,0  | 0,735 |
|                            | Вся плавка             | 123 000 | 114 000 | 4—25 | 1—50 | 6—15 | 38,10 | 27,9  | 25,9  | 0,73  |
|                            | Расплавление<br>(695В) | 82 300  | 70 250  | 2—44 | 0—54 | 3—38 | 39,50 | 30,1  | 25,7  | 0,765 |
|                            | Окисление              | 18 700  | 17 200  | 1—00 | —    | 1—00 | 25,40 | 18,7  | 17,2  | 0,735 |
|                            | Рафинировка            | 15 700  | 13 950  | 1—05 | 0—12 | 1—17 | 19,35 | 14,5  | 12,9  | 0,75  |
|                            | Вся плавка             | 116 700 | 101 400 | 4—49 | 1—06 | 5—55 | 32,00 | 24,2  | 21,0  | 0,757 |
|                            | Расплавление<br>(650В) | 77 700  | 7 100   | 2—20 | 1—10 | 3—30 | 44,85 | 33,0  | 30,4  | 0,735 |
|                            | Окисление              | 27 000  | 26 500  | 1—05 | 0—25 | 1—30 | 34,95 | 24,9  | 24,5  | 0,71  |

ветствует  $K_{\Sigma 1} = 1,306$ . Задаемся повторно  $K''_3 = 1,25$  и определяем  $\cos \varphi'' = \sqrt{1 - (60 \cdot 3,8 \cdot 1,25 / 440)^2} = 0,76$ , чему соответствует  $K_{\Sigma 2} = 1,262$ .

Поскольку  $K_{\Sigma 2}$  отличается от  $K''_3$  всего на  $1,262 - 1,25 = 0,012$ , т.е. менее чем на 1 %, приближение считается достаточным.

Искомое индуктивное сопротивление  $X_3 = 1,25 \times 3,8 = 4,75$  мОм, а соответствующая активная мощность составляет

$$P = 3U_{\phi} I \cos \varphi = 3 \cdot 440 \cdot 60 \cdot 0,76 = 63500 \text{ кВт.}$$

Выбор оптимального электрического режима установки дуговой печи в значительной мере упрощается в случае, если печной трансформатор выполняется с несколькими ступенями вторичного напряжения, на которых обеспечивается постоянная величина мощности. При этом появляется возможность варьировать режимами работы печи без снижения мощности, например, вести начальный этап расплавления при закрытых дугах при максимальном вторичном напряжении с высоким коэффициентом мощности, затем, по мере открытия дуг, не снижая мощности, понижать напряжение во избежание недопустимого перегрева футеровки.

Для расчета мощности электрических потерь необходимо определить активное сопротивление фазы печного контура  $R_k$  (включая сопротивление печного трансформатора), из которого следует вычесть сопротивление участка электрода, находящегося в печном пространстве (поскольку выделяющаяся на этом участке мощность является полезной).

В табл. 3.14 приведены данные электрических режимов некоторых ДСП вместимостью от 5 до 200 т. Наибольший интерес представляют показатели работы печей в период расплавления, которые обычно являются определяющими для оценки производительности печей и расхода электроэнергии. В остальные значительно менее энергоемкие периоды плавки эти показатели могут существенно изменяться в зависимости от особенностей технологического процесса плавки.

При успешном использовании оборудования для внепечной обработки стали в ковше роль ДСП в основном сводится к расплавлению шихты, что дает возможность наиболее полного использования мощности печного трансформатора и существенного повышения производительности печи.

# УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОВОДНИКОВ КОРОТКОЙ СЕТИ К ТОКАМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

## 1. Расчет токов короткого замыкания на стороне низшего напряжения печной установки (короткой сети)

При протекании токов по вторичному токопроводу его проводники подвергаются электродинамическим усилиям и нагреву. Такие усилия действуют на каждый проводник с током, находящимся в магнитном поле. Величина этих усилий может быть определена на основании закона Био — Савара, а нагрев — по условиям теплового баланса.

Наибольшая величина электродинамических усилий определяется максимально возможным током короткого замыкания, т. е. ударным током короткого замыкания  $i_y$ . Поэтому начальный момент короткого замыкания ( $t \approx 0,01$  с) является наиболее опасным с точки зрения величины динамических усилий. По проводникам короткой сети протекают достаточно большие токи, а ударные токи короткого замыкания могут достигать значений, при которых электродинамические усилия могут вызвать разрушения проводников короткой сети.

Для двух параллельных проводников, обтекаемых током  $i_1 = i_2 = i_y$ , наибольшая сила взаимодействия между ними,  $F$ , будет равна [12]

$$F = 2,04 \frac{i_y}{a} k_{\Phi} l \cdot 10^{-8}, \text{ Н}, \quad (\text{IV.1})$$

где  $l$  — длина проводника, см;  $a$  — расстояние между осями проводников, см;  $i_y$  — ударный ток короткого замыкания, А;  $k_{\Phi}$  — коэффициент формы (для трубчатых шин  $k_{\Phi} = 1$ , для шин прямоугольного сечения  $k_{\Phi}$  определяется по кривым [12]). При трехфазном токе и расположении проводников в одной плоскости средняя фаза имеет усилие

$$F = 2,04 \frac{\sqrt{3}}{2} (\tilde{i}_y^{(3)})^2 \frac{l}{a} 10^{-8} = 1,76 (\tilde{i}_y^{(3)})^2 \frac{l}{a} 10^{-8}, \text{ Н}. \quad (\text{IV.2})$$

Таким образом, в случае короткого замыкания в

проводниках короткой сети необходимо знать как рассчитывается ударный ток короткого замыкания  $\tilde{i}_y$ . Определение ударного тока короткого замыкания в короткой сети производится по методике, изложенной в работе [13].

Анализ работы некоторых электропечных агрегатов (фосфорных) показал, что наиболее вероятными точками внешнего металлического короткого замыкания являются места соприкосновения между собой подвижных башмаков электрододержателя, приводящего к двухфазному короткому замыканию электропечного контура. Кроме того, может иметь место короткое замыкание между проводниками короткой сети, хотя вероятность таких замыканий гораздо меньше, чем коротких замыканий на башмаках электрододержателя.

Значение ударного тока короткого замыкания

$$i_y = k_y \sqrt{2} I_\infty, \quad (\text{IV.3})$$

где  $k_y = \left(1 + e^{-\frac{t}{T_a}}\right)$  — коэффициент аperiodической составляющей тока короткого замыкания:  $t = 0,01$  с,

$$T_a = \frac{x_\Sigma}{\omega r_\Sigma};$$

$I_\infty$  — (значение периодической составляющей ударного тока короткого замыкания) определяется расчетным значением приведенного реактивного сопротивления  $x_p$  по методике, изложенной в работе [12]. Этот же ток определяет нагрев проводников  $\dot{x}_p = x^* \frac{S_c}{S_\phi}$ , где  $S_\phi$  — базисная мощность, равная 100 МВ·А;  $S_c$  — мощность системы

$$\dot{x} = x_\Sigma \frac{S_\phi}{U_{\text{нн}}^2},$$

где  $U_{\text{нн}}$  — номинальное напряжение стороны низшего напряжения;  $x_\Sigma$  — суммарное реактивное сопротивление до точки короткого замыкания.

Величина суммарного реактивного сопротивления до точки короткого замыкания имеет вид

$$x_\Sigma = x_c + x_{\text{тр}} + x_{\text{л}} + x_{\text{л}},$$

где  $x_c$  — приведенное реактивное сопротивление системы, МОм;  $x_{\text{тр}}$  — реактивное сопротивление трансформатора, МОм;  $x_{\text{л}}$  — реактивное сопротивление пакета

шинного или трубчатого, мОм);  $x_{\text{л}}$  — реактивное сопротивление гибких лент (или кабелей), мОм. Приведенное реактивное сопротивление системы равно

$$x_{\text{с}} = x_{\text{ср}} \frac{U_{\text{нн}}^2}{U_{\text{р}}^2}, \quad (\text{IV.4})$$

где  $x_{\text{ср}}$  — реактивное сопротивление системы, приведенное к расчетному напряжению, Ом.

Величина  $x_{\text{ср}}$  принимается по данным проекта электроснабжения. Приведенное к низшей стороне трансформатора значение  $x_{\text{с}}$  лежит в пределах 0,1 — 0,2 мОм.

Если исходить из разрывной мощности выключателя  $S_{\text{р}}$ , то реактивное сопротивление системы составит

$$x_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{р}}^2}{S_{\text{р}}}. \quad (\text{IV.5})$$

Расчеты показывают, что реактивное сопротивление трансформатора, приведенное к стороне низшего напряжения, остается примерно равным на всех ступенях напряжения трансформатора.

Активное сопротивление участка контура печной установки до места короткого замыкания равно

$$r_{\Sigma} = r_{\text{тр}} + r_{\text{п}} + r_{\text{л}} + r_{\text{к}},$$

где  $r_{\text{тр}}$  — приведенное сопротивление трансформатора, мОм;  $r_{\text{п}}$  — активное сопротивление пакета (шинного или трубчатого), мОм;  $r_{\text{к}}$  — сопротивление контакта.

Составляющие формул (IV.3) и (IV.4) могут быть определены по материалам третьей главы, либо расчетным путем по материалам пятой и шестой глав настоящего справочника.

Величина периодической составляющей линейного тока трехфазного короткого замыкания в точке  $K$  может быть определена для стороны НН из выражения

$$I_{\text{лк}}^{(3)} = \frac{E_{\text{с}}}{x_{\Sigma}} = \frac{U_{\text{с}} U_{\text{нн}}}{\sqrt{3} U_{\text{вн}} x_{\Sigma}}. \quad (\text{IV.6})$$

Величина периодической составляющей линейного тока двухфазного короткого замыкания по формуле:

$$I_{\text{лк}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3} I_{\text{лк}}^{(3)}}{2} = \frac{U_{\text{с}} U_{\text{нн}}}{2 U_{\text{вн}} x_{\Sigma}}. \quad (\text{IV.7})$$

Фазный ток двухфазного короткого замыкания равен

$$I_{\text{фк}}^{(2)} = \frac{I_{\text{лк}}^{(3)}}{\sqrt{3}} = \frac{U_{\text{с}} \cdot U_{\text{нн}}}{3U_{\text{вн}} x_{\Sigma}}. \quad (\text{IV.8})$$

В формулах (IV.6)—(IV.8) приняты следующие обозначения:  $U_{\text{с}}$  — линейное напряжение питающей сети, В;  $U_{\text{нн}}$  — номинальное напряжение ступени трансформатора со стороны низшего напряжения, В;  $U_{\text{вн}}$  — номинальное напряжение стороны высшего напряжения, В. Таким образом могут быть найдены все составляющие, входящие в формулу (IV.2) для определения ударного тока короткого замыкания.

## 2. Электродинамические усилия в проводниках короткой сети (механический резонанс)

Электродинамические усилия в проводниках вторичного токопровода могут возникать не только вследствие возникновения коротких замыканий, но и вследствие механического резонанса, который при определенных условиях может возникать в шинопроводе при протекании переменного тока. Наибольшую опасность механический резонанс представляет при токах короткого замыкания. Одиночную шину, закрепленную с двух концов, по которой протекает переменный ток можно рассматривать как упругую систему, имеющую собственные колебания определенной частоты и подвергающуюся воздействию периодически изменяющихся усилий, зависящих от частоты тока в сети. Исследования показали, что при выборе вторичного токопровода и размеров шин в установках переменного тока нельзя пренебрегать опасностью возникновения механического резонанса [14].

Механические усилия в шинах при коротких замыканиях имеют колебательный характер, так как электродинамическая сила пульсирует с двойной частотой переменного тока. Шины же, благодаря упругости, обладают также собственными механическими колебаниями, частота которых может оказаться близкой или совпасть с частотой электродинамических усилий. Если собственная частота шин равна частоте переменного тока, то наступает раскачивание и сильные вибрации, а при удвоенной частоте механический резонанс, при котором усилия и напряжения в материале шин могут возрасти сверх допустимых значений и достигнуть опасных вели-

чин. При вибрации напряжения в металле шин могут увеличиться в 2—3 раза, а при механическом резонансе в 3—5 раз и более, в результате чего при коротких замыканиях возможны разрушения шин. Поэтому кроме обычного расчета шин на механическую прочность производится проверка собственной частоты конструкции. Для предотвращения возникновения вибраций и резонансных явлений необходимо, чтобы расчетная частота собственных колебаний шинной конструкции на участках между жесткими креплениями была ниже 30 Гц или выше 130 Гц, т. е. частот, близких к стандартной промышленной или ее удвоенному значению.

Частота собственных колебаний, Гц, медных и алюминиевых шин прямоугольного сечения определяется следующими формулами [12]

$$\left. \begin{aligned} f_M &= 3,62 \cdot 10^5 \frac{b}{l^2} \\ f_A &= 5,02 \cdot 10^5 \frac{b}{l^2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.9})$$

где  $f_M$  и  $f_A$  — частота собственных колебаний соответственно медных и алюминиевых шин;  $b$  — толщина шины, см;  $l$  — длина пролета между точками опоры.

Из формул (IV.9) следует, что частота собственных колебаний прямоугольных шин прямо пропорциональна размеру стороны поперечного сечения, параллельной направлению колебаний, и обратно пропорциональна квадрату пролета. Изменяя параметры  $b$  и  $l$ , можно в необходимых пределах изменять собственные частоты колебаний прямоугольных шин. В том случае, когда расчетная величина частоты собственных колебаний шин оказывается близкой к границам опасной зоны, а изменение параметров шин с целью удаления от опасной зоны невозможно, возникает необходимость определить значение усилия, действующего в пролете, с учетом влияния собственных колебаний. Это усилие определяется следующим образом:

1. Рассчитывается усилие  $F$ , возникающее в шинах при прохождении тока короткого замыкания.
2. По номограмме рис. IV.1 находится отношение  $M/\sqrt{b}$  (для медных и алюминиевых шин прямоугольного сечения в зависимости от величин  $l$  и  $b$ ).
3. Из рис. IV.2 определяется коэффициент усиления частоты собственных колебаний  $K_c$  в зависимости от отношения  $l/\sqrt{b}$ .



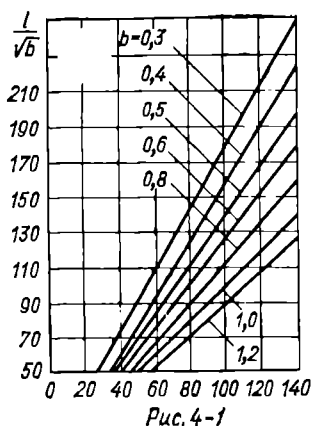


Рис. 4-1

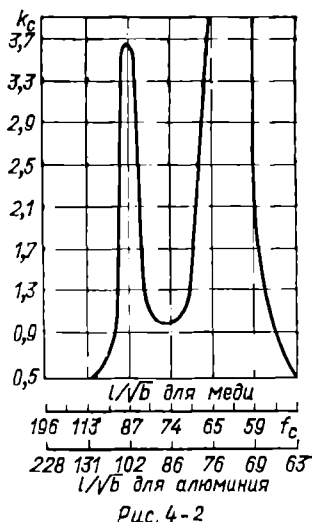


Рис. 4-2

Рис. IV.1. Номограмма для определения отношения  $l/\sqrt{b}$  для шин прямоугольного сечения

Рис. IV.2. Номограмма для определения коэффициента  $K_c$  при проверке ши́ны на механический резонанс

4. Определяется действительное усилие в шинах с учетом собственных колебаний.

По этому усилию производится проверка ши́ны на динамическое воздействие токов короткого замыкания.

Вышеизложенное касалось электродинамических усилий, возникающих в основном в одиночных шинах для случая жесткого крепления шин. Однако шинопроводы коротких сетей руднотермических печей обычно состоят из пакетов шин, проложенных параллельно друг другу и не имеют жесткого крепления к опорам, а висят на свободных подвесках. Исследования вибраций и электродинамических усилий, возникающих в проводниках коротких сетей, показали, что при расчетах собственных колебаний шинного пакета руднотермических печей за длину пролета необходимо брать не расстояние  $l_1$  между свободными подвесками, а расстояние  $l_2$  между стяжками по длине шинного пакета (рис. IV.3) [14].

Собственные частоты колебаний шинного пакета короткой сети определяются по выражениям резонансных колебаний шинопровода. При резонансных колебаниях

частота возмущающей силы совпадает с собственной частотой исследуемой системы. Наличие резонанса обнаруживается по значительно большим амплитудам колебаний системы на резонансной частоте по сравнению с амплитудами колебаний на других (нерезонансных) частотах. Причем, на резонансной частоте достигает максимального значения не только амплитуда перемещения, но и амплитуды скорости и перемещения. Поэтому о наличии резонанса можно судить по амплитудам перемещения, скорости или ускорению в любой точке шинопровода. Кроме того, перемещение, скорость и ускорение при резонансных колебаниях имеют чисто синусоидальную форму, а на промежуточных частотах являются результатом сложения синусоидальных колебаний с различными частотами. Исследования, проведенные с помощью схемы измерения резонансных частот шинных пакетов, приведенных в работе [14], показали, что для расчета частот собственных колебаний шинных пакетов из меди и алюминия могут быть использованы формулы (IV.9) для расчета частот собственных колебаний одиночных шин. В этой же работе приводится формула расчета частот собственных колебаний шинных пакетов из алюминиевого сплава АД-31, нашедшего в последнее время применение при замене медных шин

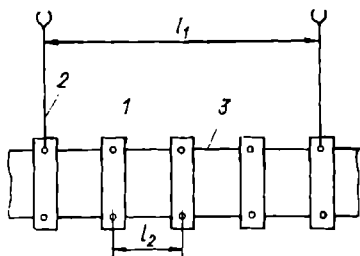


Рис. IV.3. Расположение подвесок и отяжек на шинном пакете короткой сети

$$f_c = 5,64 \cdot 10^{-5} \frac{b}{l^2}, \text{ Гц.} \quad (\text{IV.10})$$

Для алюминиевого сплава АД-31 коэффициент  $5,64 \cdot 10^5$  получен экспериментально [14].

В общем случае

$$f_c = \frac{4,73^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{Sj}},$$

где  $E$  — модуль упругости (для меди —  $1,1 \cdot 10^5$  кг/см<sup>2</sup>, для алюминия —  $0,65 \cdot 10^5$  кг/см<sup>2</sup>);  $I$  — момент инерции

поперечного сечения, см<sup>4</sup>;  $S$  — поперечное сечение, см<sup>2</sup>;  $j$  — плотность материала шины.

Таким образом, для шинопроводов коротких сетей проверку выбранного сечения на динамическую прочность выполняют в следующей последовательности:

1. Определяют ток короткого замыкания по изложенной выше методике.

2. Определяют токи отдельных проводников при коротком замыкании, исходя из распределения тока, приведенном в главе VI.

3. Определяют силу взаимодействия между отдельными проводниками короткой сети по формулам (IV.1) или (IV.2). Причем общая сила, действующая на про-

водник, равна  $F = \sum_1^n f_{1i}$ , где  $f_{1i}$  — сила взаимодействия отдельных пар токов проводников.

4. Вычисляют механическое напряжение  $\sigma = \frac{Fl}{W_n}$ , где  $W_n$  — момент сопротивления, см<sup>3</sup>;  $l$  — расстояние между стяжками пакета короткой сети.

Расстояние  $l$  между стяжками выбирается из условия предотвращения появления механического резонанса, для медных шин  $l=500-700$  мм, а для алюминиевого сплава  $l=400-500$  мм. Более точно оно определяется, используя выражения (IV.9) — (IV.10).

Допустимое значение механического напряжения составляет для медных шин 1400 Н/см<sup>2</sup>, для алюминиевых — 700 Н/см<sup>2</sup>. Это составляет примерно 60 % значения временного сопротивления.

5. После окончательного выбора вновь проводят проверку на механический резонанс.

Выбранное сечение  $S$  должно быть меньше принятого для исполнения короткой сети. Если это условие не обеспечивается, необходимо соответственно увеличить габариты отдельных проводников короткой сети.

### **3. Нагрев проводников короткой сети при коротком замыкании**

При коротких замыканиях сверхтоки могут превышать рабочие токи во много раз и поэтому нагревать проводники до температуры, превышающей температуру, достигнутую к моменту короткого замыкания. Длительность короткого замыкания ограничена действием ре-

лейной защиты и составляет доли секунды или несколько секунд. Поэтому превышение температуры также кратковременно. После действия токов короткого замыкания (т. к. з.) температура достаточно быстро падает.

Однако несмотря на продолжительность короткого замыкания, температура проводника нарастает очень быстро и может достигнуть больших и опасных значений. Установлено, что кратковременное действие температуры на изоляцию оказывает меньшее разрушающее влияние, чем та же температура при длительном воздействии, поэтому при действии т. к. з. могут быть достигнуты более высокие температуры, чем при длительных нагрузках, при длительном нагреве в условиях нормального режима. При этом принято, что до т. к. з. температура уже достигла значений, допустимых в длительном режиме (шины —  $75^{\circ}\text{C}$ , аппараты —  $75^{\circ}\text{C}$ , многоамперные токопроводы —  $90^{\circ}\text{C}$ ).

Выбор термически устойчивого сечения шин и кабеля при коротких замыканиях проводят с использованием выражения [14]

$$S = \alpha I_{\infty} \sqrt{t_{\pi}},$$

где  $\alpha$  — термический коэффициент,  $\text{мм}^2 (\text{kA} \cdot \text{с}^{1/2})$ ;  $I_{\infty}$  — установившийся ток короткого замыкания в отдельном проводнике;  $t_{\pi}$  — приведенное время работы под т. к. з. Это время определяется, согласно методике, изложенной в работе [14], из зависимости отношения начального т. к. з. к установившемуся току, изображенной на рис. IV.4, т. е. из зависимости  $t_{\text{ср.пр}} = f(x)$ , где  $x = I_{\text{нач}}/I_{\text{ср}}$  и от времени прохождения т. к. з. Это время — сумма времен срабатывания релейной защиты ( $t_{\text{р.з}}$ ) и собственного времени отключения высоковольтного выключателя ( $t_{\text{в}}$ ).

Термический коэффициент для медных шин  $\alpha = 6$ , для кабелей с медными жилами — 7, с алюминиевыми жилами — 12, а для алюминиевых шин — 11.

Соответственно предельно допустимая температура при т. к. з. равна 300, 250 и  $200^{\circ}\text{C}$ .

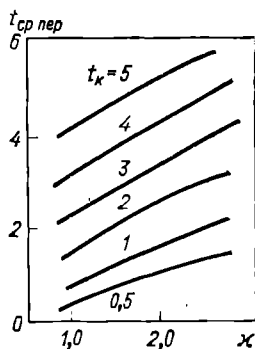


Рис. IV.4. Приведенное время тока короткого замыкания

# **1. Общие положения**

Расчет реактивных сопротивлений коротких сетей осуществляется либо классическим методом, либо методом обобщающих выражений (аналитический метод).

В последнее время при расчете реактивных сопротивлений коротких сетей находит применение ЭВМ.

Во всех методах расчета короткая сеть разбивается на  $n$  последовательных участков. Индуктивное сопротивление такого сложного контура может быть выражено через собственную индуктивность отдельных участков и взаимную индуктивность между ними:

$$\left. \begin{aligned} L &= \sum_{k=1}^n L_k + \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n M_{k,i} \\ M &= \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n M_{k,i} \end{aligned} \right\} k \neq i,$$

где  $L_k$  — собственная индуктивность  $k$ -того участка;  $M_{k,i}$  — взаимная индуктивность между  $k$ -тым и  $i$ -тым участком.

Величины  $L_k$  и  $M_{k,i}$  определяются классическими формулами Максвелла, наиболее подробно изложенными в [15].

В классическом методе расчета реактивных сопротивлений по этим формулам определяется собственная индуктивность каждого проводника короткой сети и взаимная индуктивность данного проводника со всеми другими проводниками. Так как число проводников в каждом участке короткой сети велико, то весьма велико число собственных и взаимных индуктивностей, которое надо рассчитать по формулам Максвелла. В связи с этим классический метод расчета реактивных сопротивлений является очень трудоемким и в настоящее время не находит практическое применение. Классический метод расчета коротких сетей применялся, в основном, до шестидесятых годов [16], когда был предложен метод обобщающих выражений [17]. Сущность этого метода заключается в том, что на основании классических формул Максвелла выводятся обобщенные выра-

жения, позволяющие рассчитать индуктивность отдельных проводников (участков). Полученные обобщенные формулы для различных схем и конфигураций коротких сетей, не только позволили упростить и значительно ускорить определение реактивных сопротивлений коротких сетей электродуговых печей, но и создать таблицы и нормалы для расчета их реактивных сопротивлений. Использование обобщенных формул, таблиц и нормалей, которые приведены ниже, относительно просто позволяет без особых трудностей в короткий срок рассчитать несколько вариантов коротких сетей.

Однако метод обобщенных выражений имеет свои недостатки, из которых основными являются:

1. Обобщенные выражения и полученные на их основе таблицы и нормалы справедливы только для тех конструкций коротких сетей, для которых эти обобщенные формулы получены, в связи с чем расчет новых конструкций коротких сетей требует получения (вывода) новых обобщенных формул, а также составления таблиц и нормалей.

2. Необходимость применения ручного счета, требующего определенной затраты времени.

Увеличение мощности современных электродуговых печей требует более детального рассмотрения различных вариантов коротких сетей с целью выбора рационального варианта. Для устранения недостатков предыдущих методов расчета в последние годы был разработан метод расчета реактивных сопротивлений с помощью ЭВМ. Использование ЭВМ ускоряет и уточняет расчеты так как программой расчета индуктивных сопротивлений предусматривается не только вычисление собственных и взаимных индуктивностей, но и учет сдвига фаз и направления тока в отдельных проводниках.

Алгоритм расчета индуктивного сопротивления кабелей ДСП включает определение действующей индуктивности вертикальных и криволинейного участков каждого кабеля в отдельности и последующее суммирование результатов для каждого проводника [18]. Затем с учетом фазности кабелей различным фазам (полус — фазам) вычисляют индуктивное сопротивление фаз.

Алгоритм для расчета реактивных сопротивлений токопровода, позволяющий учесть изменение конфигураций отдельных участков короткой сети ферросплавных печей с целью выбора наилучшего варианта, разработан в работе [19].

Расчет на ЭВМ может производиться с помощью классических формул, в которых геометрические размеры проводников и расстояния между ними задаются с помощью выражений аналитической геометрии. В качестве критериев для распознавания месторасположения проводников можно использовать выражения [22]:

$$A = \frac{b(D_{21}^2 - D_{11}^2 - a^2) + a \cos \varphi (D_{12}^2 - D_{11}^2 - b^2)}{2ab(1 - \cos^2 \varphi)};$$

$$B = \frac{a(D_{12}^2 - D_{11}^2 - b^2) + b \cos \varphi (D_{12}^2 - D_{11}^2 - a^2)}{2ab(1 - \cos^2 \varphi)},$$

где «a» и «b» — длина проводников;  $D_{11}$ ,  $D_{22}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{21}$  — расстояние между началами (в индексе цифра 1) и концами (в индексе цифра 2) пары проводников;

$$\cos \varphi = \frac{D_{12}^2 + D_{21}^2 - D_{11}^2 - D_{22}^2}{2ab}.$$

Для пары параллельных проводников A и B теряют смысл, так как приобретают бесконечные значения. Для этого случая получены другие критерии распознавания вариантов взаимного расположения:

$$\cos \gamma_1 = \frac{D_{11}^2 + a^2 - D_{21}^2}{2a D_{11}};$$

$$\cos \gamma_2 = \frac{D_{22}^2 + a^2 - D_{12}^2}{2a D_{22}},$$

где  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — углы между одним из проводников (здесь длиной «a») и соответственно отрезками  $D_{11}$  и  $D_{22}$ .

С помощью названных критериев было установлено, что возможны всего 36 принципиально отличающихся вариантов взаимного расположения пары проводников в трехмерном пространстве. Из них в 25 вариантах проводники направлены под углом  $\varphi$ , а в 11 вариантах проводники параллельны.

При математической подготовке вариантов для автоматизированных расчетов использован «принцип приведения». Такое решение упрощает процесс программирования и обеспечивает большую наглядность.

Программа-функция осуществляет поиск координат двух любых проводников, распознавание взаимного их расположения в пространстве и расчет взаимной индуктивности.

Другой подход к расчетам на ЭВМ представляет собой программирование обобщающих аналитических выражений, изложенных в данной главе с составлением комплексной программы САПР короткой сети по выбору варианта с учетом потерь активной энергии и экономической плотности тока.

Методу расчета реактивных сопротивлений коротких сетей с помощью ЭВМ также присущи определенные недостатки:

1. Для каждой новой конструкции короткой сети необходимо разрабатывать новую программу.
2. Отсутствует сборник необходимых программ.
3. Требуется наличие необходимой вычислительной техники.

Поэтому при расчете реактивных сопротивлений коротких сетей необходимо произвести сравнительный анализ пригодности с точки зрения простоты и точности метода обобщенных выражений и метода с помощью ЭВМ и выбрать тот, который быстрее и точнее обеспечит решение конкретной задачи определения реактивного сопротивления коротких сетей. В расчетах обобщающих выражений индуктивностей участков короткой сети предполагаются следующие условия: линейность проводников (линейные размеры поперечного сечения малы по сравнению с другими их размерами); низкая частота тока (неравномерность распределения по сечению проводников незначительна) —  $f=50$  Гц; абсолютная магнитная проницаемость вещества и окружающей его среды одинакова и равна магнитной проницаемости пустоты ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м); трехфазная система токов симметрична.

Реактивное сопротивление участка короткой сети определяется частотой тока и действующей индуктивностью ( $L_d$ ). Под действующей индуктивностью следует понимать индуктивность, обусловленную общим взаимодействием всех потоков самоиндукции и взаимоиндукции. Собственной индуктивностью или коэффициентом самоиндукции контура называют отношение потока самоиндукции к силе тока в нем:

$$L = \frac{\Psi_L}{I}.$$

Взаимной индукцией или коэффициентом взаимной индукции двух цепей называется отношение полного потока взаимной индукции, сцепляющегося с контуром



одной из цепей к силе тока в другой цепи:

$$M_{12} = \frac{\Psi_{2M}}{I_1}; \quad M_{21} = \frac{\Psi_{1M}}{I_2}$$

$M_{12} = M_{21}$  (по теории взаимности).

Потоком самоиндукции контура называется полный магнитный поток, сцепляющийся с этим контуром и обусловленный током в нем, а потоком взаимной индукции — полный магнитный поток, сцепляющийся с данным контуром и обусловленный токами в других контурах.

Предполагается, что магнитная проницаемость среды, в которой замыкаются магнитные линии потоков самоиндукции и взаимной индукции, не зависит от величины напряженности магнитного поля. При этом условии потоки  $\Psi_L$  и  $\Psi_M$  пропорциональны обуславливающим их токам, а индуктивности  $L$  и  $M$  не зависят от токов и определяются лишь формой и геометрическими размерами контуров, магнитной проницаемостью проводов и окружающей их среды, а при переменном токе так же и характером распределения токов по сечению проводников. Взаимная индуктивность зависит еще и от взаимного расположения контуров. На каждом участке однофазной или трехфазной сети, состоящей из двух и более проводников, индуктируется не только э. д. с., самоиндукции, обусловленная переменным током в этом проводнике, но также и э. д. с. взаимной индукции, обусловленная токами в других проводниках сети. Из уравнения, определяющего энергию магнитного поля участка однофазной сети, состоящей из двух одинаковых проводников находим действующую индуктивность

$$L_d = L_{11} + L_{22} - M_{12} - M_{21},$$

где  $L_{11} = L_{22}$  — собственные индуктивности проводников 1 и 2;  $M_{12} = M_{21} = M$  — взаимные индуктивности между проводниками 1 и 2;

Действующая индуктивность  $i$ -того проводника трехфазной или многофазной короткой сети

$$L_i = \frac{U_i}{j\omega I_i},$$

где  $U_i$  — реактивное падение на  $i$ -том проводнике;  $I_i$  — ток в нем;  $\omega$  — угловая частота.

Действующая индуктивность  $i$ -того проводника лю-

бой фазы может быть определена по следующей формуле:

$$L_i = L_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n a M_{ik},$$

где  $L_{ii}$  — собственная индуктивность проводника;  $M_{ik}$  — взаимная индуктивность между проводниками различных фаз;  $a = c \cdot \cos \alpha$  — составляющая комплекса соотношения векторов токов, протекающих по проводникам  $i$  и  $k$ ;  $c$  — характеризуется отношением токов по величине модулей;  $\cos \alpha$  — определяется сдвигом векторов токов по фазе.

При симметричной трехфазной системе

$$a = -\frac{1}{2} \left( c = 1, \cos \alpha = -\frac{1}{2} \right).$$

При определении взаимоиндукции от проводников с линейным током на проводники с фазным током (см. рис. 1.1, в)  $\cos \alpha$  будет иметь следующие значения:

а) от  $I_1$  на  $I_{12}$ :

$$\left( \frac{I_1}{I_{12}} = \frac{I_3}{I_{31}} = \frac{I_2}{I_{32}} \right), \quad \cos \alpha = -\frac{\sqrt{3}}{2};$$

б) от  $I_3$  на  $I_{12}$

$$\left( \frac{I_3}{I_{12}} = \frac{I_2}{I_{31}} = \frac{I_1}{I_{32}} \right), \quad \cos \alpha = 0$$

в) от  $I_2$  на  $I_{12}$ :

$$\left( \frac{I_2}{I_{12}} = \frac{I_1}{I_{31}} = \frac{I_3}{I_{32}} \right), \quad \cos \alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

При симметричной системе линейных и фазных токов  $c = \sqrt{3}$ .

Предлагаемые ниже расчетные формулы приведены к виду, при котором значения реактивных сопротивлений получаются в омах (Ом), а индуктивности в генри (Г). При этом все линейные размеры в формулах следует подставлять в сантиметрах (см), а при пользовании нормальными в метрах (м). Исходные общие выражения для вывода расчетных формул принимались по работам [20, 21].

### Расчетные формулы

1. Индуктивность линейного провода в общем случае. Собственная индуктивность линей-

ного провода в практически встречающихся случаях:

$$L = N - G, \quad (V.1)$$

где  $N$  — величина, зависящая только от формы и размеров оси провода и от характера распределения тока по сечению;  $G$  — величина, зависящая от формы и размеров поперечного сечения и характера распределения тока по сечению.

а) Для прямолинейного провода:

$$N = 2l(\ln 2l - 1) 10^{-9}, \quad (V.2)$$

где  $l$  — длина провода.

б) Для провода, изогнутого по дуге окружности:

$$N = 2R \left[ \Theta (\ln 8R - 2) + 4 \sin \frac{\Theta}{2} - 4I^* \right] 10^{-9}, \quad (V.3)$$

где  $R$  — радиус окружности, по дуге которой изогнута ось провода;  $\Theta$  — центральный угол, соответствующий дуге провода, в радианах;  $I^*$  — величина, значения которой для различных углов приведены в табл. 5.1.

$$G = 2l \ln g \cdot 10^{-9}, \quad (V.4)$$

где  $g$  — среднее геометрическое расстояния площади поперечного сечения провода от самой себя (с. г. р.).

Собственная индуктивность проводников ( $L$ ) может быть определена по формуле:

$$L(M) = 2l \cdot \left( \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + g^2}}{g} - \frac{\sqrt{l^2 + g^2}}{l} + \frac{g}{l} \right) 10^{-9} \quad (V.5)$$

В случае  $l \gg g$ :

$$L(M) = 2l \left( \ln \frac{2l}{g} - 1 \right) 10^{-9}. \quad (V.6)$$

ТАБЛИЦА 5.1

ЗНАЧЕНИЯ  $I^*$  В ФОРМУЛЕ (V.3)

| θ,<br>град | $I^*$ | θ,<br>град | $I^*$ | θ,<br>град | $I^*$ | θ,<br>град | $I^*$ |
|------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
| 10         | 0,180 | 350        | 0,180 | 100        | 0,789 | 260        | 0,789 |
| 20         | 0,300 | 340        | 0,300 | 110        | 0,819 | 250        | 0,819 |
| 30         | 0,397 | 330        | 0,397 | 120        | 0,846 | 240        | 0,846 |
| 40         | 0,479 | 320        | 0,479 | 130        | 0,868 | 230        | 0,868 |
| 50         | 0,549 | 310        | 0,549 | 140        | 0,885 | 220        | 0,885 |
| 60         | 0,611 | 300        | 0,611 | 150        | 0,899 | 210        | 0,899 |
| 70         | 0,664 | 290        | 0,664 | 160        | 0,908 | 200        | 0,908 |
| 80         | 0,712 | 280        | 0,712 | 170        | 0,914 | 190        | 0,914 |
| 90         | 0,753 | 270        | 0,753 | 180        | 0,916 | 180        | 0,916 |

| $g/l$  | $F$    | $g/l$  | $F$    | $g/l$  | $F$   | $g/l$  | $F$   |
|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|
| 0,0001 | 17,807 | 0,0045 | 10,203 | 0,0090 | 8,760 | 0,0140 | 7,938 |
|        | 16,421 |        | 10,159 |        | 8,739 |        | 7,910 |
|        | 15,610 |        | 10,116 | 0,0095 | 8,718 |        | 7,918 |
|        | 15,035 |        | 10,074 |        | 8,697 |        | 7,896 |
| 0,0005 | 14,589 |        | 10,033 |        | 8,677 | 0,0145 | 7,882 |
|        | 14,225 | 0,0050 | 9,993  |        | 8,657 |        | 7,869 |
|        | 13,917 |        | 9,953  |        | 8,636 |        | 7,855 |
|        | 13,650 |        | 9,915  | 0,0100 | 8,617 |        | 7,842 |
|        | 13,414 |        | 9,877  |        | 8,597 |        | 7,829 |
| 0,0010 | 13,204 |        | 9,840  |        | 8,577 | 0,0150 | 7,816 |
|        | 13,013 | 0,0055 | 9,803  |        | 8,558 |        | 7,802 |
|        | 12,840 |        | 9,767  |        | 8,539 |        | 7,789 |
|        | 12,680 |        | 9,732  | 0,0105 | 8,520 |        | 7,777 |
|        | 12,532 |        | 9,698  |        | 8,501 |        | 7,764 |
| 0,0015 | 12,394 |        | 9,664  |        | 8,483 | 0,0155 | 7,751 |
|        | 12,265 | 0,0060 | 9,630  |        | 8,464 |        | 7,738 |
|        | 12,144 |        | 9,597  |        | 8,446 |        | 7,726 |
|        | 12,030 |        | 9,565  | 0,0110 | 8,428 |        | 7,713 |
|        | 11,922 |        | 9,533  |        | 8,410 |        | 7,701 |
| 0,0020 | 11,819 |        | 9,502  |        | 8,392 | 0,0160 | 7,688 |
|        | 11,722 | 0,0065 | 9,471  |        | 8,375 |        | 7,676 |
|        | 11,629 |        | 9,441  |        | 8,357 |        | 7,664 |
|        | 11,541 |        | 9,411  | 0,0115 | 8,340 |        | 7,652 |
|        | 11,456 |        | 9,381  |        | 8,323 |        | 7,640 |
| 0,0025 | 11,374 |        | 9,352  |        | 8,306 | 0,0165 | 7,628 |
|        | 11,296 | 0,0070 | 9,324  |        | 8,289 |        | 7,616 |
|        | 11,221 |        | 9,296  |        | 8,272 |        | 7,604 |
|        | 11,148 |        | 9,268  | 0,0120 | 8,254 |        | 7,592 |
|        | 11,078 |        | 9,241  |        | 8,239 |        | 7,581 |
| 0,0030 | 11,011 |        | 9,214  |        | 8,223 | 0,0170 | 7,569 |
|        | 10,945 | 0,0075 | 9,187  |        | 8,207 |        | 7,558 |
|        | 10,884 |        | 9,161  |        | 8,191 |        | 7,546 |
|        | 10,820 |        | 9,135  | 0,0125 | 8,175 |        | 7,535 |
|        | 10,771 |        | 9,109  |        | 8,159 |        | 7,523 |
| 0,0035 | 10,003 |        | 9,084  |        | 8,144 | 0,0175 | 7,512 |
|        | 10,647 | 0,0080 | 9,059  |        | 8,128 |        | 7,501 |
|        | 10,592 |        | 9,034  |        | 8,113 |        | 7,490 |
|        | 10,539 |        | 9,010  | 0,0130 | 8,098 |        | 7,479 |
|        | 10,488 |        | 8,986  |        | 8,083 |        | 7,468 |
| 0,0040 | 10,437 |        | 8,962  |        | 8,068 | 0,0180 | 7,457 |
|        | 10,388 | 0,0085 | 8,939  |        | 8,053 |        | 7,446 |
|        | 10,340 |        | 8,915  |        | 8,038 |        | 7,435 |
|        | 10,293 |        | 8,892  | 0,0135 | 8,023 |        | 7,424 |
|        | 10,099 |        | 8,870  |        | 8,009 |        | 7,414 |
|        | 10,090 |        | 8,847  |        | 7,994 | 0,0185 | 7,403 |
|        | 10,081 | 0,0090 | 8,825  |        | 7,980 |        | 7,392 |
|        | 10,072 |        | 8,803  |        | 7,966 |        | 7,382 |
|        | 10,247 |        | 8,782  | 0,0140 | 7,952 |        | 7,371 |

| g/l    | F     | g/l    | F     | g/l    | F     | g/l    | F     |
|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 0,0185 | 7,361 | 0,0235 | 6,902 | 0,0285 | 6,531 | 0,0335 | 6,222 |
| 0,0190 | 7,351 | 0,0240 | 6,893 | 0,0290 | 6,525 | 0,0340 | 6,216 |
|        | 7,340 |        | 6,885 |        | 6,518 |        | 6,211 |
|        | 7,330 |        | 6,877 |        | 6,511 |        | 6,205 |
|        | 7,330 |        | 6,869 |        | 6,505 |        | 6,199 |
|        | 7,310 |        | 6,861 |        | 6,498 |        | 6,194 |
| 0,0195 | 7,300 | 0,0245 | 6,853 | 0,0295 | 6,492 | 0,0345 | 6,188 |
|        | 7,290 |        | 6,845 |        | 6,485 |        | 6,183 |
|        | 7,280 |        | 6,837 |        | 6,478 |        | 6,177 |
|        | 7,270 |        | 6,829 |        | 6,472 |        | 6,171 |
|        | 7,260 |        | 6,822 |        | 6,465 |        | 6,166 |
| 0,0200 | 7,250 | 0,0250 | 6,814 | 0,0300 | 6,459 | 0,0350 | 6,160 |
|        | 7,240 |        | 6,806 |        | 6,452 |        | 6,155 |
|        | 7,231 |        | 6,798 |        | 6,446 |        | 6,149 |
|        | 7,221 |        | 6,790 |        | 6,440 |        | 6,144 |
|        | 7,211 |        | 6,783 |        | 6,433 |        | 6,138 |
| 0,0205 | 7,202 | 0,0255 | 6,775 | 0,0305 | 6,427 | 0,0355 | 6,133 |
|        | 7,192 |        | 6,767 |        | 6,420 |        | 6,128 |
|        | 7,183 |        | 6,760 |        | 6,414 |        | 6,122 |
|        | 7,173 |        | 6,752 |        | 6,408 |        | 6,117 |
|        | 7,164 |        | 6,745 |        | 6,402 |        | 6,111 |
| 0,0210 | 7,154 | 0,0260 | 6,737 | 0,0310 | 6,395 | 0,0360 | 6,106 |
|        | 7,145 |        | 6,730 |        | 6,389 |        | 6,101 |
|        | 7,136 |        | 6,722 |        | 6,383 |        | 6,095 |
|        | 7,127 |        | 6,715 |        | 6,377 |        | 6,090 |
|        | 7,118 |        | 6,707 |        | 6,370 |        | 6,085 |
| 0,0215 | 7,108 | 0,0265 | 6,700 | 0,0315 | 6,364 | 0,0365 | 6,079 |
|        | 7,099 |        | 6,693 |        | 6,358 |        | 6,074 |
|        | 7,090 |        | 6,685 |        | 6,352 |        | 6,069 |
|        | 7,081 |        | 6,678 |        | 6,346 |        | 6,064 |
|        | 7,072 |        | 6,671 |        | 6,330 |        | 6,058 |
| 0,0220 | 7,063 | 0,0270 | 6,664 | 0,0320 | 6,334 | 0,0370 | 6,053 |
|        | 7,055 |        | 6,656 |        | 6,328 |        | 6,048 |
|        | 7,046 |        | 6,649 |        | 6,322 |        | 6,043 |
|        | 7,037 |        | 6,642 |        | 6,316 |        | 6,038 |
|        | 7,028 |        | 6,635 |        | 6,310 |        | 6,032 |
| 0,0225 | 7,019 | 0,0275 | 6,628 | 0,0325 | 6,304 | 0,0375 | 6,027 |
|        | 7,011 |        | 6,621 |        | 6,298 |        | 6,022 |
|        | 7,002 |        | 6,614 |        | 6,292 |        | 6,017 |
|        | 6,994 |        | 6,607 |        | 6,286 |        | 6,012 |
|        | 6,985 |        | 6,600 |        | 6,280 |        | 6,007 |
| 0,0230 | 6,976 | 0,0280 | 6,593 | 0,0330 | 6,274 | 0,0380 | 6,002 |
|        | 6,968 |        | 6,586 |        | 6,268 |        | 5,997 |
|        | 6,960 |        | 6,579 |        | 6,262 |        | 5,992 |
|        | 6,951 |        | 6,572 |        | 6,257 |        | 5,987 |
|        | 6,943 |        | 6,565 |        | 6,251 |        | 5,982 |
| 0,0235 | 6,934 | 0,0285 | 6,559 | 0,0335 | 6,245 | 0,0385 | 5,977 |
|        | 6,926 |        | 6,552 |        | 6,239 |        | 5,972 |
|        | 6,918 |        | 6,545 |        | 6,234 |        | 5,967 |
|        | 6,910 |        | 6,538 |        | 6,228 |        | 5,962 |

| <i>l</i> | <i>F</i> | <i>g/l</i> | <i>F</i> | <i>g/l</i> | <i>F</i> | <i>g/l</i> | <i>F</i> |
|----------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 0,0385   | 5,957    | 0,0435     | 5,725    | 0,0485     | 5,519    | 0,0570     | 5,202    |
| 0,0390   | 5,952    | 0,0440     | 5,720    | 0,0490     | 5,515    | 0,0580     | 5,195    |
|          | 5,947    |            | 5,716    |            | 5,511    |            | 5,189    |
|          | 5,942    |            | 5,712    |            | 5,507    |            | 5,182    |
|          | 5,937    |            | 5,707    |            | 5,503    |            | 5,176    |
|          | 5,932    |            | 5,703    |            | 5,499    |            | 5,169    |
| 0,0395   | 5,927    | 0,0445     | 5,699    | 0,0495     | 5,496    | 0,0590     | 5,163    |
|          | 5,922    |            | 5,694    |            | 5,492    |            | 5,157    |
|          | 5,918    |            | 5,690    |            | 5,488    |            | 5,150    |
|          | 5,913    |            | 5,685    |            | 5,484    |            | 5,144    |
|          | 5,908    |            | 5,682    |            | 5,480    |            | 5,138    |
| 0,0400   | 5,903    | 0,0450     | 5,677    | 0,0500     | 5,476    | 0,0600     | 5,131    |
|          | 5,898    |            | 5,673    |            | 5,469    |            | 5,125    |
|          | 5,894    |            | 5,669    |            | 5,461    |            | 5,119    |
|          | 5,889    |            | 5,665    |            | 5,454    |            | 5,112    |
|          | 5,884    |            | 5,660    |            | 5,446    |            | 5,106    |
| 0,0405   | 5,879    | 0,0455     | 5,656    | 0,0510     | 5,439    | 0,0610     | 5,100    |
|          | 5,875    |            | 5,652    |            | 5,431    |            | 5,094    |
|          | 5,870    |            | 5,648    |            | 5,424    |            | 5,088    |
|          | 5,865    |            | 5,644    |            | 5,417    |            | 5,082    |
|          | 5,860    |            | 5,640    |            | 5,409    |            | 5,075    |
| 0,0410   | 5,856    | 0,0460     | 5,635    | 0,0520     | 5,402    | 0,0620     | 5,070    |
|          | 5,851    |            | 5,631    |            | 5,395    |            | 5,063    |
|          | 5,846    |            | 5,627    |            | 5,387    |            | 5,057    |
|          | 5,842    |            | 5,623    |            | 5,380    |            | 5,051    |
|          | 5,837    |            | 5,619    |            | 5,373    |            | 5,045    |
| 0,0415   | 5,833    | 0,0465     | 5,615    | 0,0530     | 5,365    | 0,0630     | 5,039    |
|          | 5,827    |            | 5,611    |            | 5,359    |            | 5,034    |
|          | 5,823    |            | 5,607    |            | 5,351    |            | 5,028    |
|          | 5,818    |            | 5,602    |            | 5,344    |            | 5,022    |
|          | 5,814    |            | 5,598    |            | 5,337    |            | 5,016    |
| 0,0420   | 5,809    | 0,0470     | 5,594    | 0,0540     | 5,330    | 0,0640     | 5,010    |
|          | 5,805    |            | 5,590    |            | 5,323    |            | 5,004    |
|          | 5,800    |            | 5,586    |            | 5,316    |            | 4,998    |
|          | 5,796    |            | 5,582    |            | 5,309    |            | 4,992    |
|          | 5,791    |            | 5,578    |            | 5,302    |            | 4,987    |
| 0,0425   | 5,787    | 0,0475     | 5,574    | 0,0550     | 5,295    | 0,0650     | 4,981    |
|          | 5,782    |            | 5,570    |            | 5,289    |            | 4,975    |
|          | 5,778    |            | 5,566    |            | 5,282    |            | 4,968    |
|          | 5,773    |            | 5,562    |            | 5,275    |            | 4,964    |
|          | 5,769    |            | 5,558    |            | 5,268    |            | 4,959    |
| 0,0430   | 5,764    | 0,0480     | 5,554    | 0,0560     | 5,261    | 0,0660     | 4,952    |
|          | 5,760    |            | 5,550    |            | 5,255    |            | 4,947    |
|          | 5,756    |            | 5,546    |            | 5,248    |            | 4,941    |
|          | 5,751    |            | 5,542    |            | 5,241    |            | 4,935    |
|          | 5,747    |            | 5,538    |            | 5,235    |            | 4,930    |
| 0,0435   | 5,742    | 0,0485     | 5,534    | 0,0570     | 5,228    | 0,0670     | 4,924    |
|          | 5,738    |            | 5,530    |            | 5,221    |            | 4,919    |
|          | 5,733    |            | 5,527    |            | 5,215    |            | 4,913    |
|          | 5,729    |            | 5,523    |            | 5,208    |            | 4,907    |

| g/l    | F     | g/l    | F     | g/l    | F     | g/l    | F     |
|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 0,0670 | 4,902 | 0,0770 | 4,646 | 0,0870 | 4,423 | 0,0970 | 4,227 |
| 0,0680 | 4,896 | 0,0780 | 4,641 | 0,0880 | 4,419 | 0,0980 | 4,223 |
|        | 4,891 |        | 4,637 |        | 4,415 |        | 4,219 |
|        | 4,885 |        | 4,632 |        | 4,411 |        | 4,216 |
|        | 4,880 |        | 4,627 |        | 4,407 |        | 4,212 |
|        | 4,875 |        | 4,622 |        | 4,403 |        | 4,208 |
| 0,0690 | 4,869 | 0,0790 | 4,618 | 0,0890 | 4,399 | 0,0990 | 4,205 |
|        | 4,864 |        | 4,613 |        | 4,394 |        | 4,201 |
|        | 4,858 |        | 4,608 |        | 4,390 |        | 4,197 |
|        | 4,853 |        | 4,604 |        | 4,386 |        | 4,194 |
|        | 4,848 |        | 4,599 |        | 4,382 |        | 4,190 |
| 0,0700 | 4,842 | 0,0800 | 4,594 | 0,0900 | 4,378 | 0,1000 | 4,186 |
|        | 4,837 |        | 4,590 |        | 4,374 | 0,1050 | 4,098 |
|        | 4,832 |        | 4,585 |        | 4,370 | 0,1100 | 4,015 |
|        | 4,826 |        | 4,581 |        | 4,366 | 0,1150 | 3,935 |
|        | 4,821 |        | 4,576 |        | 4,362 | 0,1200 | 3,860 |
| 0,0710 | 4,816 | 0,0810 | 4,572 | 0,0910 | 4,358 | 0,1250 | 3,787 |
|        | 4,811 |        | 4,567 |        | 4,354 | 0,1300 | 3,718 |
|        | 4,805 |        | 4,562 |        | 4,350 | 0,1350 | 3,652 |
|        | 4,800 |        | 4,558 |        | 4,346 | 0,1400 | 3,589 |
|        | 4,795 |        | 4,553 |        | 4,342 | 0,1450 | 3,528 |
| 0,0720 | 4,790 | 0,0820 | 4,549 | 0,0920 | 4,338 | 0,1500 | 3,463 |
|        | 4,785 |        | 4,544 |        | 4,334 | 0,1550 | 3,413 |
|        | 4,779 |        | 4,540 |        | 4,330 | 0,1600 | 3,359 |
|        | 4,774 |        | 4,536 |        | 4,326 | 0,1650 | 3,306 |
|        | 4,769 |        | 4,531 |        | 4,322 | 0,1700 | 3,256 |
| 0,0730 | 4,764 | 0,0830 | 4,527 | 0,0930 | 4,318 | 0,1750 | 3,207 |
|        | 4,759 |        | 4,522 |        | 4,314 | 0,1800 | 3,160 |
|        | 4,754 |        | 4,518 |        | 4,310 | 0,1850 | 3,114 |
|        | 4,749 |        | 4,513 |        | 4,306 | 0,1900 | 3,070 |
|        | 4,714 |        | 4,509 |        | 4,303 | 0,1950 | 3,027 |
| 0,0740 | 4,739 | 0,0840 | 4,505 | 0,0940 | 4,299 | 0,200  | 2,985 |
|        | 4,734 |        | 4,500 |        | 4,295 | 0,205  | 2,945 |
|        | 4,729 |        | 4,496 |        | 4,291 | 0,210  | 2,906 |
|        | 4,724 |        | 4,492 |        | 4,287 | 0,215  | 2,867 |
|        | 4,718 |        | 4,487 |        | 4,283 | 0,220  | 2,830 |
| 0,0750 | 4,714 | 0,0850 | 4,483 | 0,0950 | 4,279 | 0,225  | 2,794 |
|        | 4,709 |        | 4,479 |        | 4,276 | 0,230  | 2,759 |
|        | 4,704 |        | 4,474 |        | 4,271 | 0,235  | 2,725 |
|        | 4,699 |        | 4,470 |        | 4,268 | 0,240  | 2,692 |
|        | 4,694 |        | 4,466 |        | 4,264 | 0,245  | 2,659 |
| 0,0760 | 4,689 | 0,0860 | 4,461 | 0,0960 | 4,260 | 0,250  | 2,628 |
|        | 4,684 |        | 4,457 |        | 4,257 | 0,260  | 2,567 |
|        | 4,681 |        | 4,453 |        | 4,253 | 0,270  | 2,509 |
|        | 4,675 |        | 4,449 |        | 4,249 | 0,280  | 2,453 |
|        | 4,670 |        | 4,444 |        | 4,245 | 0,290  | 2,400 |
| 0,0770 | 4,665 | 0,0870 | 4,440 | 0,0970 | 4,242 | 0,300  | 2,350 |
|        | 4,660 |        | 4,436 |        | 4,237 | 0,310  | 2,301 |
|        | 4,656 |        | 4,433 |        | 4,234 | 0,320  | 2,255 |
|        | 4,651 |        | 4,428 |        | 4,230 | 0,330  | 2,210 |

| $g/l$ | $F$   | $g/l$ | $F$   | $g/l$ | $F$   | $g/l$ | $F$   |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,340 | 2,167 | 0,670 | 1,314 | 1,000 | 0,934 | 2,80  | 0,353 |
| 0,350 | 2,126 | 0,680 | 1,298 | 1,050 | 0,895 | 2,90  | 0,341 |
| 0,360 | 2,086 | 0,690 | 1,283 | 1,100 | 0,858 | 3,00  | 0,330 |
| 0,370 | 2,047 | 0,700 | 1,268 | 1,15  | 0,824 | 3,10  | 0,320 |
| 0,380 | 2,010 | 0,710 | 1,253 | 1,20  | 0,793 | 3,20  | 0,310 |
| 0,390 | 1,975 | 0,720 | 1,238 | 1,25  | 0,764 | 3,30  | 0,301 |
| 0,400 | 1,940 | 0,730 | 1,224 | 1,30  | 0,737 | 3,40  | 0,292 |
| 0,410 | 1,907 | 0,740 | 1,211 | 1,35  | 0,711 | 3,50  | 0,284 |
| 0,420 | 1,875 | 0,750 | 1,197 | 1,40  | 0,688 | 3,60  | 0,276 |
| 0,430 | 1,844 | 0,760 | 1,184 | 1,45  | 0,665 | 3,70  | 0,269 |
| 0,440 | 1,814 | 0,770 | 1,171 | 1,50  | 0,645 | 3,80  | 0,262 |
| 0,450 | 1,784 | 0,780 | 1,158 | 1,55  | 0,625 | 3,90  | 0,255 |
| 0,460 | 1,756 | 0,790 | 1,146 | 1,60  | 0,607 | 4,00  | 0,249 |
| 0,470 | 1,729 | 0,800 | 1,134 | 1,65  | 0,589 | 4,20  | 0,237 |
| 0,480 | 1,702 | 0,810 | 1,122 | 1,70  | 0,573 | 4,40  | 0,226 |
| 0,490 | 1,676 | 0,820 | 1,110 | 1,75  | 0,557 | 4,60  | 0,216 |
| 0,500 | 1,651 | 0,830 | 1,099 | 1,80  | 0,542 | 4,80  | 0,207 |
| 0,510 | 1,627 | 0,840 | 1,088 | 1,85  | 0,528 | 5,00  | 0,199 |
| 0,520 | 1,603 | 0,850 | 1,077 | 1,90  | 0,515 | 5,20  | 0,192 |
| 0,530 | 1,580 | 0,860 | 1,066 | 1,95  | 0,502 | 5,40  | 0,185 |
| 0,540 | 1,558 | 0,870 | 1,055 | 2,00  | 0,490 | 5,60  | 0,178 |
| 0,550 | 1,536 | 0,880 | 1,045 | 2,05  | 0,479 | 5,80  | 0,172 |
| 0,560 | 1,515 | 0,890 | 1,035 | 2,10  | 0,468 | 6,00  | 0,166 |
| 0,570 | 1,494 | 0,900 | 1,025 | 2,15  | 0,457 | 6,25  | 0,160 |
| 0,580 | 1,474 | 0,910 | 1,015 | 2,20  | 0,447 | 6,50  | 0,153 |
| 0,590 | 1,454 | 0,920 | 1,005 | 2,25  | 0,437 | 6,75  | 0,148 |
| 0,600 | 1,435 | 0,930 | 0,996 | 2,30  | 0,428 | 7,00  | 0,143 |
| 0,610 | 1,416 | 0,940 | 0,987 | 2,35  | 0,419 | 7,50  | 0,133 |
| 0,620 | 1,398 | 0,950 | 0,977 | 2,40  | 0,411 | 8,00  | 0,125 |
| 0,630 | 1,381 | 0,960 | 0,969 | 2,45  | 0,403 | 8,50  | 0,117 |
| 0,640 | 1,366 | 0,970 | 0,960 | 2,50  | 0,395 | 9,00  | 0,111 |
| 0,650 | 1,346 | 0,980 | 0,951 | 2,60  | 0,380 | 10,00 | 0,100 |
| 0,660 | 1,330 | 0,990 | 0,943 | 2,70  | 0,366 |       |       |

Для расчета собственной индуктивности удобнее пользоваться формулой:

$$L(M) = lF \cdot 10^{-9}, \quad (V.7)$$

где  $F=f(g/l)$  — приведены в табл. 5.2 для наиболее часто встречающихся отношений  $g/l$ .

Средние геометрические расстояния (с. г. р.) некоторых проводников и фигур приведены ниже:

с. г. р. прямолинейного отрезка длиной  $b$  от самого



себя

$$g = 0,223b. \quad (V.8)$$

С. г. р. площади круга от самой себя

$$g = 0,779r. \quad (V.9)$$

С. г. р. площади круглого кольца с внутренним и наружным радиусом  $r_{вн}$  и  $r_n$  от самой себя определяется формулой:

$$\ln g = \ln r_n - \frac{r_{вн}^4}{(r_n^2 - r_{вн}^2)^2} \ln \frac{r_n}{r_{вн}} + \frac{1}{4} \frac{3r_{вн}^2 - r_n^2}{r_n^2 - r_{вн}^2} \quad (V.10)$$

или можно пользоваться формулой

$$g = cr_n, \quad (V.11)$$

взяв значения коэффициента  $c$  из табл. 5.3.

Для основных типоразмеров трубчатых проводников имеем

$$g = 2,1945 \text{ см для } 2r_n = 50 \text{ мм, } 2r_{вн} = 30 \text{ мм,}$$

$$g = 2,6838 \text{ см для } 2r_n = 60 \text{ мм, } 2r_{вн} = 40 \text{ мм.}$$

Для оценки с. г. р. можно пользоваться также формулой  $g = \frac{r_{вн} + r_n}{2}$ , однако ее точность не превышает 10 %.

С. г. р. площади прямоугольника от самой себя со значительной степенью точности определяется формулой

$$g = 0,2236(b + c), \quad (V.12)$$

где  $c$  и  $b$  — стороны прямоугольника.

ТАБЛИЦА 5.3

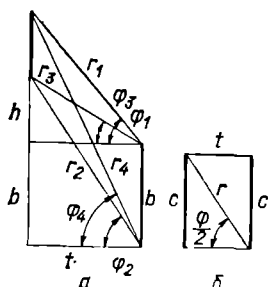
СРЕДНЕГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ РАССТОЯНИЕ ПЛОЩАДИ ТРУБЧАТОГО ПРОВОДНИКА ОТ САМОЙ СЕБЯ

| $\frac{r_{вн}}{r_n}$ | $c = \frac{g}{r_n}$ | $\frac{r_{вн}}{r_n}$ | $c = \frac{g}{r_n}$ |
|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| 0,0                  | 0,7788              | 0,5                  | 0,8519              |
| 0,1                  | 0,7825              | 0,6                  | 0,8778              |
| 0,2                  | 0,7930              | 0,7                  | 0,9058              |
| 0,3                  | 0,8087              | 0,8                  | 0,9358              |
| 0,4                  | 0,8286              | 0,9                  | 0,9672              |
| 0,5                  | 0,8519              | 1,0                  | 1,0000              |

II. Взаимная индуктивность двух параллельных проводов одинаковой длины может быть определена по формулам (V.5) — (V.7), где  $g$  — с. г. р. между сечениями проводников.

С. г. р. между площадями двух колец, лежащих одно вне другого, равно расстоянию между их центрами.

Рис. V.1. С. г. р. между двумя параллельными отрезками



С. г. р. между прямолинейными параллельными отрезками (рис. V.1, а) определяется формулой

$$bc \ln g = t^2 \ln \frac{r_1 r_2}{r_3 r_4} - \frac{1}{2} (r_1^2 \ln r_1 + r_2^2 \ln r_2 - r_3^2 \ln r_3 - r_4^2 \ln r_4) - t [(h+c) \varphi_1 + (h+b) \varphi_2 + h \varphi_3 - (h+b+c) \varphi_4] - \frac{3}{2} bc. \quad (\text{V.13})$$

Если  $b=c$ ,  $h=-b$  (рис. V.1, б), то

$$\ln g = \frac{t^2}{c^2} \ln \frac{t}{r} + \ln r + \frac{t}{c} \varphi - \frac{3}{2}, \quad (\text{V.14})$$

где  $r^2 = t^2 + c^2$ .

С. г. р. между площадями двух одинаковых прямоугольников, расположенных согласно рис. V.2, а, определяется из формулы

$$\ln g = \ln 0,223 + \frac{1}{2} \left( \frac{t}{b} + 1 \right)^2 \ln (t+c+b) + \frac{1}{2} \left( \frac{t}{b} - 1 \right)^2 \ln (t+c-b) - \left( \frac{t}{b} \right)^2 \ln (t+c). \quad (\text{V.15})$$

Для вычисления с. г. р. удобно пользоваться табл. 5.4.

Взаимная индуктивность параллельных проводов, расположенных согласно рис. V.3, может быть найдена по формулам:

| $t/c$ | $g/c$ | $t/c$ | $g/c$ | $t/c$ | $g/c$ | $t/c$ | $g/c$ | $t/c$ | $g/c$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,001 | 0,223 | 0,180 | 0,354 | 0,360 | 0,498 | 0,540 | 0,652 | 0,720 | 0,813 |
| 0,010 | 0,230 | 0,190 | 0,362 | 0,370 | 0,506 | 0,550 | 0,661 | 0,730 | 0,823 |
| 0,020 | 0,237 | 0,200 | 0,369 | 0,380 | 0,515 | 0,560 | 0,670 | 0,740 | 0,832 |
| 0,030 | 0,244 | 0,210 | 0,377 | 0,390 | 0,523 | 0,570 | 0,680 | 0,750 | 0,841 |
| 0,040 | 0,251 | 0,220 | 0,385 | 0,400 | 0,531 | 0,580 | 0,688 | 0,760 | 0,850 |
| 0,050 | 0,258 | 0,230 | 0,393 | 0,410 | 0,540 | 0,590 | 0,696 | 0,770 | 0,859 |
| 0,060 | 0,265 | 0,240 | 0,400 | 0,420 | 0,548 | 0,600 | 0,705 | 0,780 | 0,868 |
| 0,070 | 0,272 | 0,250 | 0,408 | 0,430 | 0,557 | 0,610 | 0,716 | 0,790 | 0,878 |
| 0,080 | 0,280 | 0,260 | 0,416 | 0,440 | 0,565 | 0,620 | 0,723 | 0,800 | 0,887 |
| 0,090 | 0,287 | 0,270 | 0,424 | 0,450 | 0,574 | 0,630 | 0,732 | 0,810 | 0,896 |
| 0,100 | 0,294 | 0,280 | 0,432 | 0,460 | 0,583 | 0,640 | 0,741 | 0,820 | 0,905 |
| 0,110 | 0,301 | 0,290 | 0,440 | 0,470 | 0,591 | 0,650 | 0,750 | 0,830 | 0,914 |
| 0,120 | 0,309 | 0,300 | 0,449 | 0,480 | 0,600 | 0,660 | 0,759 | 0,840 | 0,924 |
| 0,130 | 0,316 | 0,310 | 0,457 | 0,490 | 0,609 | 0,670 | 0,768 | 0,850 | 0,933 |
| 0,140 | 0,324 | 0,320 | 0,465 | 0,500 | 0,617 | 0,680 | 0,777 | 0,860 | 0,942 |
| 0,150 | 0,331 | 0,330 | 0,473 | 0,510 | 0,626 | 0,690 | 0,786 | 0,870 | 0,952 |
| 0,160 | 0,339 | 0,340 | 0,481 | 0,520 | 0,635 | 0,700 | 0,795 | 0,880 | 0,961 |
| 0,170 | 0,346 | 0,350 | 0,490 | 0,530 | 0,643 | 0,710 | 0,804 | 0,890 | 0,970 |

для расположения проводов по рис. V.3, а расчет производится по формуле (V.7):

для расположения проводов по рис. V.3, в

$$2M = M_{\alpha} - M_{\beta} - M_j + M_{\delta}, \quad (V.16)$$

где  $\alpha = a + d + b$ ;  $\beta = a + d$ ;  $j = b + d$ ;  $\delta = d$ ; предполагается, что токи протекают в одном направлении;

для расположения проводов по рис. V.3, з

$$2M = M_{b+p} + M_{b+q} - M_p - M_q; \quad (V.17)$$

для расположения по рис. V.3, д и V.3, е соответственно

$$2M = M_a + M_b - M_{a-b}; \quad (V.18)$$

$$2M = M_{a+b} - M_a - M_b. \quad (V.19)$$

Для расположения по рис. V.3, ж

$$2M = M_{a+b-d} + M_d - M_{a-d} - M_{b-d}. \quad (V.20)$$

Провода, расположенные по одной прямой (рис. V.3, б)

$$M = [(a + b + d) \ln(a + b + d) d \ln d - (a + d) \ln(a + d) - (b + d) \ln(b + d)] 10^{-9}. \quad (V.21)$$

где  $a$  и  $b$  — длины проводников,  $d$  — ближайшее расстояние между ними. Если  $d$  равно 0, то

$$M = [(a + b) \ln(a + b) - a \ln a - b \ln b] 10^{-9}. \quad (V.22)$$

Прямолинейные провода, сходящиеся в одной точке (рис. 4, а):

$$M = aF \cdot 10^{-9}, \quad (V.23)$$

где  $F$  — величина, значения которой даны в табл. 5.5 в зависимости от  $\cos \varphi$  и отношения  $b/a$ ,  $\varphi$  — угол между проводами;  $a$  и  $b$  — длины проводов (рис. V.4, а); предполагается, что токи направлены от общей точки.

Непараллельные провода в одной плоскости (рис. V.4, б):

$$M = M_{(x_2, y_2)} + M_{(x_1, y_1)} - M_{(x_1, y_2)} - M_{(x_2, y_1)}, \quad (V.24)$$

где  $M_{(x_2, y_2)}$  — взаимная индуктивность прямолинейных проводов длиной  $x_2$  и  $y_2$ , сходящихся в одной точке;  $M_{(x_1, y_1)}$  — то же, для проводов длиной  $x_1$  и  $y_1$ ; причем  $x_1, x_2, y_1, y_2$  — расстояния, показанные на рис. V.4, б.

Во всех случаях угол между проводами  $a$  и  $b$  предполагается равным углу  $\varphi$ . Взаимные индуктивности  $M_{(x_2, y_2)(x_1, y_1)}$ ,  $M_{(x_1, y_2)}$ ,  $M_{(x_2, y_1)}$  могут быть найдены с

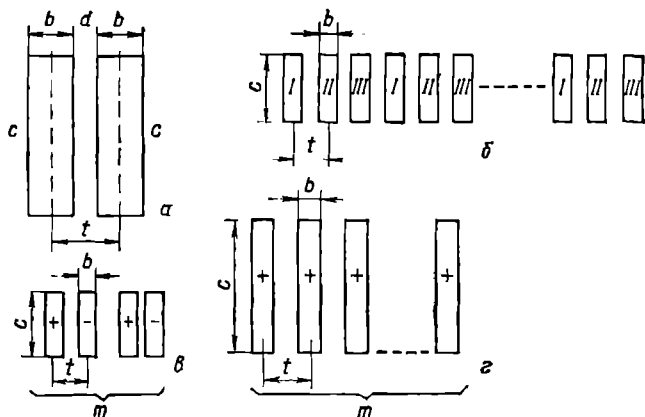


Рис. V.2. Сечения шинных пакетов коротких сетей

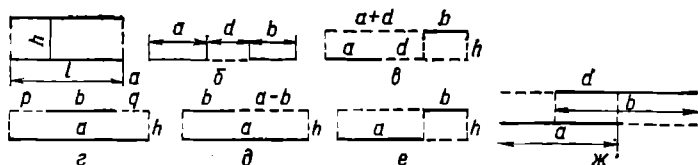


Рис. V.3. Взаимная индуктивность двух прямолинейных параллельных проводников, различно расположенных один относительно другого

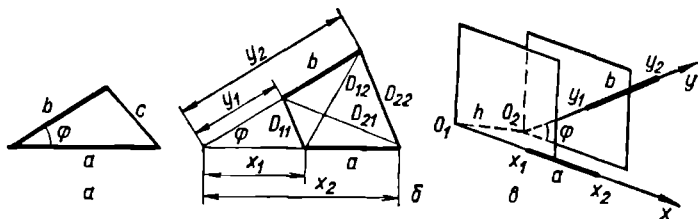


Рис. V.4. Взаимная индуктивность двух прямолинейных непараллельных проводников, различно расположенных один относительно другого

помощью табл. 5.5, так как указано в предыдущем пункте.

Общий случай двух прямолинейных проводов.

Всегда можно провести две параллельные плоскости так, чтобы в каждой из них лежал один из данных проводов (рис. V.4, в). Если  $\varphi$  — угол между проводами ( $0 \leq \varphi \leq \pi$ ),  $x$  и  $y$  — координаты, отсчитываемые от общего перпендикуляра  $O_1O_2$  к проводам в направлении

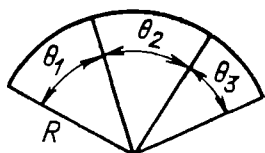


Рис. V.5. Взаимная индуктивность двух проводников, изогнутых по дугам окружности

протекающих по ним токов,  $x_1, x_2, y_1, y_2$  — координаты начал и концов проводов,  $D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}$  — расстояния между началами и концами проводов, то

$$M = 2 \cos \varphi \left( x_2 \operatorname{Arth} \frac{b}{D_{22} + D_{21}} + y_2 \operatorname{Arth} \frac{a}{D_{22} + D_{12}} - \right. \\ \left. - x_1 \operatorname{Arth} \frac{b}{D_{11} + D_{12}} - y_1 \operatorname{Arth} \frac{a}{D_{11} + D_{21}} + \frac{h}{\sin \varphi} A \right) 10^{-9}, \quad (\text{V.25})$$

где

$$A = \operatorname{arctg} \left( \frac{x_1 + y_1 + D_{11}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) + \operatorname{arctg} \left( \frac{x_2 + y_2 + D_{22}}{h} \times \right. \\ \left. \times \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) - \operatorname{arctg} \left( \frac{x_1 + y_2 + D_{12}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) - \\ - \operatorname{arctg} \left( \frac{x_2 + y_1 + D_{21}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right), \quad (\text{V.26})$$

причем

$$\left. \begin{aligned} D_{11}^2 &= x_1^2 + y_1^2 - 2x_1 y_1 \cos \varphi + h^2; \\ D_{12}^2 &= x_1^2 + y_2^2 - 2x_1 y_2 \cos \varphi + h^2; \\ D_{21}^2 &= x_2^2 + y_1^2 - 2x_2 y_1 \cos \varphi + h^2; \\ D_{22}^2 &= x_2^2 + y_2^2 - 2x_2 y_2 \cos \varphi + h^2. \end{aligned} \right\} \quad (\text{V.27})$$

При вычислении арктангенсов углы следует брать в пределах от нуля до  $\pi/2$ , если часть выражения (V.26), заключенная в круглых скобках положительна, и от нуля до  $-\pi/2$ , если это выражение отрицательно.

Значения  $F$  при различных  $b/a$ 

| $\cos \varphi$ | 1       | 0,9     | 0,8     | 0,7     | 0,6     | 0,5     | 0,4     | 0,3     | 0,2     | 0,1     |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0,95           | 3,7830  | 3,5786  | 3,3405  | 3,0683  | 2,7622  | 2,4221  | 2,0473  | 1,6348  | 1,1776  | 0,6598  |
| 90             | 3,0594  | 2,8958  | 2,7095  | 2,4980  | 2,2597  | 1,9930  | 1,6957  | 1,3643  | 0,9918  | 0,5630  |
| 85             | 2,6132  | 2,4744  | 2,3178  | 2,1411  | 1,9422  | 1,7189  | 1,4960  | 1,1877  | 0,8688  | 0,4973  |
| 80             | 2,2816  | 2,1609  | 2,0255  | 1,8735  | 1,7028  | 1,5108  | 1,2950  | 1,0512  | 0,7727  | 0,4452  |
| 0,75           | 2,0137  | 1,9071  | 1,7889  | 1,6562  | 1,5073  | 1,3399  | 1,1513  | 0,9374  | 0,6917  | 0,4008  |
| 70             | 1,7863  | 1,6922  | 1,5876  | 1,4710  | 1,3402  | 1,1932  | 1,0272  | 0,8386  | 0,6209  | 0,3615  |
| 65             | 1,5872  | 1,5038  | 1,4113  | 1,3083  | 1,1931  | 1,0636  | 0,9172  | 0,7504  | 0,5572  | 0,3258  |
| 60             | 1,4092  | 1,3352  | 1,2534  | 1,1625  | 1,0609  | 0,9468  | 0,8177  | 0,6703  | 0,4991  | 0,2929  |
| 55             | 1,2474  | 1,1820  | 1,1098  | 1,0297  | 0,9404  | 0,8400  | 0,7264  | 0,5964  | 0,4452  | 0,2622  |
| 0,50           | 1,0986  | 1,0411  | 0,9776  | 0,9074  | 0,8291  | 0,7412  | 0,6417  | 0,5277  | 0,3947  | 0,2332  |
| 40             | 0,8310  | 0,7876  | 0,7398  | 0,6870  | 0,6283  | 0,5625  | 0,4880  | 0,4024  | 0,3020  | 0,1794  |
| 30             | 0,5938  | 0,5628  | 0,5288  | 0,4913  | 0,4496  | 0,4030  | 0,3501  | 0,2893  | 0,2179  | 0,1301  |
| 20             | 0,3793  | 0,3595  | 0,3378  | 0,3140  | 0,2876  | 0,2580  | 0,2244  | 0,1856  | 0,1404  | 0,0842  |
| 10             | 0,1825  | 0,1730  | 0,1626  | 0,1512  | 0,1385  | 0,1244  | 0,1083  | 0,0898  | 0,0680  | 0,0410  |
| 0,0            | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       |
| -0,1           | -0,1707 | -0,1618 | -0,1522 | -0,1416 | -0,1298 | -0,1167 | -0,1018 | -0,0847 | -0,0644 | -0,0391 |
| 2              | -0,3316 | -0,3144 | -0,2956 | -0,2750 | -0,2523 | -0,2269 | -0,1982 | -0,1650 | -0,1257 | -0,0765 |
| 3              | -0,4840 | -0,4588 | -0,4314 | -0,4015 | -0,3684 | -0,3315 | -0,2898 | -0,2416 | -0,1844 | -0,1125 |
| 4              | -0,6290 | -0,5963 | -0,5608 | -0,5220 | -0,4791 | -0,4314 | -0,3772 | -0,3148 | -0,2406 | -0,1472 |
| 0,5            | -0,7677 | -0,7278 | -0,6845 | -0,6372 | -0,5850 | -0,5268 | -0,4611 | -0,3852 | -0,2948 | -0,1808 |
| 6              | -0,9006 | -0,8538 | -0,8031 | -0,7476 | -0,6865 | -0,6186 | -0,5416 | -0,4528 | -0,3470 | -0,2134 |
| 7              | -1,0284 | -0,9750 | -0,9172 | -0,8540 | -0,7844 | -0,7070 | -0,6194 | -0,5182 | -0,3976 | -0,2450 |
| 8              | -1,1517 | -1,0919 | -1,0272 | -0,9563 | -0,8788 | -0,7922 | -0,6944 | -0,5814 | -0,4467 | -0,2758 |
| 9              | -1,2709 | -1,2048 | -1,1335 | -1,0557 | -0,9701 | -0,8748 | -0,7671 | -0,6428 | -0,4943 | -0,3058 |
| -1,0           | -1,3862 | -1,3143 | -1,2366 | -1,1517 | -1,0585 | -0,9548 | -0,8376 | -0,7029 | -0,5406 | -0,3351 |

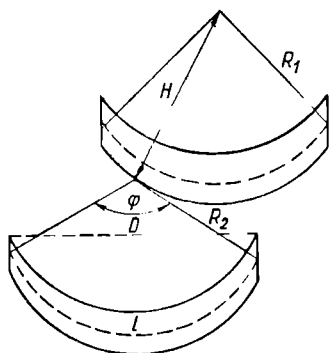
III. Взаимная индуктивность двух проводов, изогнутых по дугам одной окружности (рис. V.5)

$$M = 4R \left( \sin \frac{\theta_1 + \theta_2 + \theta_3}{2} + \sin \frac{\theta_2}{2} - \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - \right. \\ \left. - \sin \frac{\theta_2 + \theta_3}{2} - I_{123}^* - I_2^* + I_{12}^* + I_{23}^* \right) 10^{-9}. \quad (\text{V.28})$$

Значения  $I_{123}^*$ ,  $I_2^*$ ,  $I_{12}^*$ ,  $I_{23}^*$  — при  $\theta$ , равном  $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3$ ;  $\theta_2$ ;  $\theta_1 + \theta_2$ ;  $\theta_2 + \theta_3$  приведены в таблице 5.1.

IV. Взаимная и собственная продуктивности проводов, изогнутых по дугам коаксиальных окружностей, с центрами, расположенными на прямой, перпендикуляр-

Рис. V.6. Взаимная индуктивность проводов, изогнутых по дугам коаксиальных окружностей



ной плоскостям, на которых эти дуги расположены (рис. V.6), могут быть определены по следующей формуле:

$$M(L) = \sqrt{R_1 R_2} \left\{ 2(\pi - \varphi) \left[ \left( \frac{2}{k} - k \right) F \left( \frac{\pi - \varphi}{2}, k \right) - \right. \right. \\ \left. - \frac{2}{k} E \left( \frac{\pi - \varphi}{2}, k \right) - \frac{2}{k} E \left( \frac{\pi - \varphi}{2}, k \right) \right] - \\ \left. - \left[ \left( \frac{2}{k} - k \right) F \left( \frac{\pi}{2}, k \right) - \frac{2}{k} E \left( \frac{\pi}{2}, k \right) \right] \right\} - \\ - 4 \left\{ \left( \frac{2}{k} - k \right) \left[ F' \left( \frac{\pi - \varphi}{2}, k \right) - F' \left( \frac{\pi}{2}, k \right) \right] - \right. \\ \left. - \frac{2}{k} \left[ E' \left( \frac{\pi - \varphi}{2}, k \right) - E' \left( \frac{\pi}{2}, k \right) \right] \right\} 10^{-9}, \quad (\text{V.29})$$



где  $R_1$  и  $R_2$  — радиусы дуг

$$\left. \begin{aligned} F' &= \int_0^{\varphi} \frac{x dx}{1 - k^2 \sin^2 x} & E' &= \int_0^{\varphi} x \sqrt{1 - k^2 \sin^2 x} dx \\ k^2 &= \frac{4R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2 + H^2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{V.30})$$

$\varphi$  — угол, соответствующий дуге в градусах;  $H$  — расстояние между центрами дуг.

Таблицы полных и неполных эллиптических интегралов первого ( $F$ ) и второго ( $E$ ) рода приведены в работе [22], а таблицы интегралов эллиптического вида ( $F'$ ) и ( $E'$ ) приведены в работе [23].

Для случая  $\varphi = \pi$

$$\begin{aligned} M &= 4 \sqrt{R_1 R_2} \left[ \left( \frac{2}{k} - k \right) F' \left( \frac{\pi}{2}, k \right) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{2}{k} E' \left( \frac{\pi}{2}, k \right) \right] 10^{-9} = 4 \sqrt{R_1 R_2} A \cdot 10^{-9}. \end{aligned} \quad (\text{V.31})$$

$$A = \left[ \left( \frac{2}{k} - k \right) F' \left( \frac{\pi}{2}, k \right) - \frac{2}{k} E' \left( \frac{\pi}{2}, k \right) \right]. \quad (\text{V.32})$$

Значения  $A$  в формуле (V.31) могут быть определены из рис. V.7 в зависимости от величины  $k^2$  [76]. При определении собственной индуктивности по формуле (V.31)  $R_1 = R_2$ , а  $H = g_{1,1}$  в формуле (V.30). Расчет собственной и взаимной индуктивностей проводников, изогнутых по коаксиальным дугам окружностей, расположенных в параллельных плоскостях, может быть также произведен по формуле:

$$M(L) = l F_1 \cdot 10^{-9}. \quad (\text{V.33})$$

Значения  $F_1 = f(g/l, \varphi)$  для  $g/l > 0,04$  приведены в таблице 5.6.

V. Взаимная индуктивность между линейным проводником и сопряженным с ним проводником, изогнутым по дуге окружности (рис. V.8) может быть определена по формуле

$$M_{ij} = R_j \int_0^{\varphi_j} F \cos \varphi d\varphi, \quad (\text{V.34})$$

ЗНАЧЕНИЯ  $F_1 = f(g/l, \varphi)$ 

| g/l  | $\varphi^\circ$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |
|------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
|      | 120             | 125   | 130   | 135   | 140   | 145   | 150   | 155   | 160   | 165   | 170   | 175   | 180   |  |
| 0.04 | 5.404           | 5.339 | 5.274 | 5.211 | 5.147 | 5.084 | 5.021 | 4.959 | 4.896 | 4.833 | 4.769 | 4.706 | 4.643 |  |
| 0.06 | 4.548           | 4.495 | 4.442 | 4.387 | 4.332 | 4.277 | 4.220 | 4.163 | 4.105 | 4.046 | 3.937 | 3.927 | 3.867 |  |
| 0.08 | 4.002           | 3.953 | 3.902 | 3.850 | 3.797 | 3.743 | 3.689 | 3.633 | 3.577 | 3.520 | 3.462 | 3.403 | 3.344 |  |
| 0.10 | 3.598           | 3.549 | 3.500 | 3.449 | 3.398 | 3.345 | 3.292 | 2.237 | 3.182 | 3.126 | 3.069 | 3.012 | 2.954 |  |
| 0.12 | 3.277           | 3.230 | 3.182 | 3.132 | 3.082 | 3.030 | 2.977 | 2.924 | 2.870 | 2.822 | 2.764 | 2.703 | 2.646 |  |
| 0.14 | 3.015           | 2.968 | 2.921 | 2.872 | 2.823 | 2.772 | 2.720 | 2.668 | 2.615 | 2.561 | 2.506 | 2.451 | 2.396 |  |
| 0.16 | 2.793           | 2.748 | 2.701 | 2.654 | 2.605 | 2.555 | 2.505 | 2.453 | 2.401 | 2.349 | 2.295 | 2.241 | 2.187 |  |
| 0.20 | 2.438           | 2.394 | 2.350 | 2.304 | 2.257 | 2.210 | 2.161 | 2.112 | 2.062 | 2.012 | 1.961 | 1.910 | 1.858 |  |
| 0.24 | 2.164           | 2.122 | 2.079 | 2.035 | 1.991 | 1.945 | 1.899 | 1.852 | 1.804 | 1.756 | 1.707 | 1.658 | 1.609 |  |
| 0.28 | 1.944           | 1.904 | 1.863 | 1.821 | 1.778 | 1.735 | 1.691 | 1.646 | 1.600 | 1.554 | 1.508 | 1.462 | 1.415 |  |
| 0.32 | 1.765           | 1.726 | 1.687 | 1.647 | 1.606 | 1.564 | 1.522 | 1.479 | 1.436 | 1.392 | 1.348 | 1.304 | 1.259 |  |
| 0.36 | 1.614           | 1.577 | 1.540 | 1.501 | 1.462 | 1.422 | 1.382 | 1.341 | 1.300 | 1.258 | 1.216 | 1.174 | 1.132 |  |
| 0.40 | 1.487           | 1.451 | 1.415 | 1.378 | 1.341 | 1.303 | 1.264 | 1.225 | 1.186 | 1.146 | 1.106 | 1.067 | 1.026 |  |
| 0.44 | 1.377           | 1.343 | 1.309 | 1.273 | 1.238 | 1.201 | 1.164 | 1.127 | 1.090 | 1.052 | 1.014 | 0.976 | 0.938 |  |
| 0.48 | 1.282           | 1.249 | 1.216 | 1.183 | 1.148 | 1.113 | 1.078 | 1.043 | 1.007 | 1.971 | 0.935 | 0.898 | 0.862 |  |
| 0.52 | 1.198           | 1.167 | 1.136 | 1.103 | 1.070 | 1.037 | 1.003 | 0.969 | 0.935 | 0.901 | 0.866 | 0.832 | 0.797 |  |
| 0.56 | 1.125           | 1.095 | 1.065 | 1.034 | 1.002 | 0.970 | 0.938 | 0.905 | 0.873 | 0.840 | 0.807 | 0.774 | 0.741 |  |
| 0.60 | 1.060           | 1.031 | 1.002 | 0.972 | 0.942 | 0.911 | 0.880 | 0.849 | 0.818 | 0.786 | 0.755 | 0.723 | 0.692 |  |
| 0.70 | 0.924           | 0.898 | 0.872 | 0.845 | 0.817 | 0.790 | 0.762 | 0.734 | 0.705 | 0.677 | 0.649 | 0.621 | 0.592 |  |
| 0.80 | 0.819           | 0.795 | 0.771 | 0.746 | 0.721 | 0.696 | 0.671 | 0.654 | 0.619 | 0.594 | 0.568 | 0.543 | 0.518 |  |
| 0.90 | 0.734           | 0.712 | 0.690 | 0.667 | 0.645 | 0.622 | 0.599 | 0.575 | 0.552 | 0.529 | 0.505 | 0.482 | 0.459 |  |
| 1.00 | 0.665           | 0.645 | 0.624 | 0.604 | 0.583 | 0.562 | 0.540 | 0.519 | 0.497 | 0.476 | 0.455 | 0.433 | 0.412 |  |
| 2.00 | 0.340           | 0.329 | 0.318 | 0.307 | 0.295 | 0.284 | 0.272 | 0.261 | 0.249 | 0.238 | 0.227 | 0.215 | 0.204 |  |
| 3.00 | 0.228           | 0.220 | 0.213 | 0.205 | 0.197 | 0.190 | 0.182 | 0.174 | 0.166 | 0.158 | 0.151 | 0.142 | 0.136 |  |

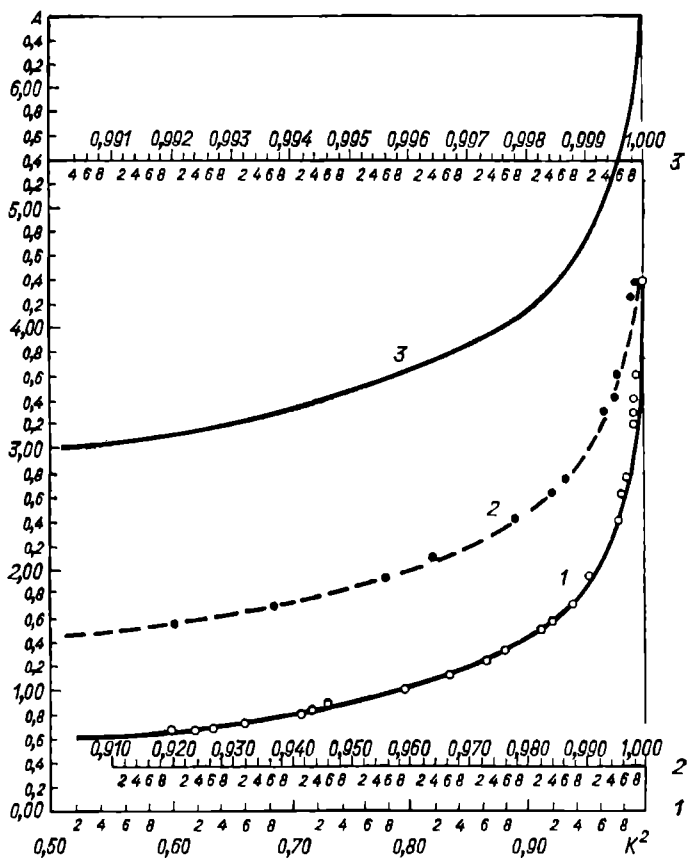


Рис. V.7. Кривая для определения  $A=f(k^2)$

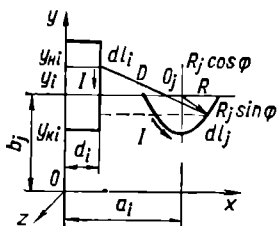


Рис. V.8. Взаимное расположение проводников

$$\text{где } F = \operatorname{arsh} \frac{y_{Hl} - (b_i - R_j \sin \varphi)}{\sqrt{[(a_j - d_i) - R_j \cos \varphi]^2 + (c_j - e_i)^2}} -$$

$$- \operatorname{arsh} \frac{y_{kl} - (b_j - R_j \sin \varphi)}{\sqrt{[(a_j - d_i) - R_j \cos \varphi]^2 + (c_j - e_i)^2}},$$

где  $R_j$  — радиус дуги  $j$ -го криволинейного проводника;  $\gamma_j$  — центральный угол, соответствующий дуге  $j$ -того проводника; причем, в соответствии с рис. V.8,  $y_{Hl}$  и  $y_{kl}$  — координаты начала и конца  $i$ -того прямолинейного проводника,  $d_i$  и  $e_i$  — координаты оси  $i$ -того прямолинейного

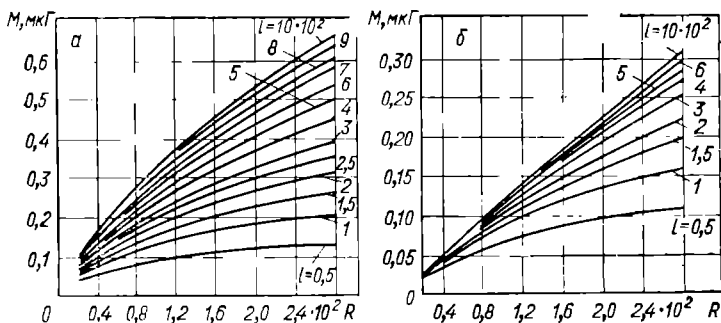


Рис. V.9. Зависимость взаимной индуктивности прямолинейных проводников различной длины  $l$  (см) и сопряженных с ними дуг окружности от радиуса дуг  $R$  (см):

$a$  — для центрального угла дуги  $\gamma = 90^\circ$ ;  $b$  — для  $\gamma = 180^\circ$

проводника;  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$  — координаты центра дуги криволинейного проводника (точка начала координат 0 — выбирается произвольно, но она постоянна для всей системы проводников).

Для упрощения расчета построены кривые, позволяющие определить взаимную индуктивность между линейными проводниками различной длины  $l$  и сопряженных с ними дугами окружности (рис. V.9).

## 2. Жесткие токопроводы коротких сетей

Ниже приведены формулы для расчета реактивных сопротивлений отдельных фаз трехфазных трубчатых и шинных пакетов коротких сетей со схемой соединения

звезда на трансформаторе и треугольник на электродах, полученные авторами с помощью табулируемых заранее вспомогательных функций ( $S_0, S_0', S_{1,1}, S_{1,m}, C_{1,m}, Q_{1,m}$  и др.), а также промежуточных выражений ( $L_0, L_1, L_2, L_3, L_F$  и др.)

Для схемы соединения короткой сети звезда на трансформаторе приводятся формулы эквивалентного сопротивления фаз короткой сети, а для схем соединения треугольник на электродах приводятся формулы эквивалентного сопротивления, включенного внутри треугольника (прямого и обратного проводника).

В формулах приняты следующие обозначения:  $X_i$  — реактивное сопротивление  $i$ -той фазы;  $n$  — число проводников в вертикальном ряду трехфазных и однофазных пакетов;  $m$  — число проводников в горизонтальном ряду трехфазных и однофазных пакетов (число вертикальных рядов);  $L, l_0, t, \alpha_{1,m}, t, \beta l$  — геометрические размеры, характеризующие короткую сеть (рис. I.2—I.13, рис. V.10);  $d$  — внешний диаметр трубчатых проводников;  $\delta$  — толщина стенки трубчатых проводников;  $c, b$  — размеры сечения шин (рис. V.2)  $g_{1,1}$  — с. г. р. площади поперечного сечения проводника от самой себя для трубчатого проводника (табл. 5.3);  $g_{1,i}$  — с. г. р. между площадями поперечных сечений первой и  $i$ -той шины (табл. 5.4).

Звезда на трансформаторе

а) Рис. I.9, а печь с прямоугольной ванной. Сечения трубчатого пакета изображено на рис. V.10, а  $l_1 \neq l_2 \neq l_3$ .

$$\left. \begin{aligned} X_I &= \frac{\pi \cdot 10^{-7}}{2} \left\{ L_1 + \frac{1}{n^2} [-2(l_1 + l_0) L_0 + (l_2 + l_0) S_{1,2} + (l_3 + l_0) C_{1,3}] + (l_2 + l_3 + 2l_0) \ln t \right\}, \\ X_{II} &= \frac{\pi \cdot 10^{-7}}{2} \left\{ L_2 + \frac{1}{n^2} [-2(l_2 + l_0) L_0 + (l_2 + l_3 + 2l_0) S_{1,2}] + (l_2 + l_3 + 2l_0) \ln t \right\}, \\ X_{III} &= \frac{\pi \cdot 10^{-7}}{2} \left\{ L_3 + \frac{1}{n^2} [-2(l_3 + l_0) L_0 + (l_3 + l_0) S_{1,2} + (l_3 + l_0) C_{1,3}] + 2(l_3 + l_0) \ln t \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (V.35)$$

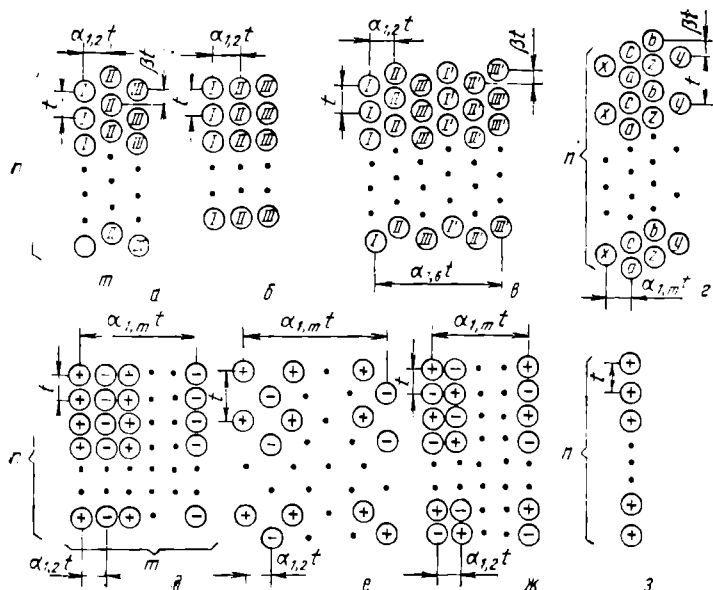


Рис. V.10. Сечения трубчатых пакетов коротких сетей

б) Рис. I.9, а, печь с прямоугольной ванной. Сечение трубчатого пакета изображено на рис. V.10, б,  $l_1 \neq l_2 \neq l_3$ .

$$\begin{aligned}
 X_I &= \frac{\pi \cdot 10^{-7}}{2} \left\{ L_1 + \frac{1}{n^2} \left[ -2(l_1 + l_0) L_0 + \right. \right. \\
 &+ (l_2 + l_0) C_{1,2} + (l_3 + l_0) C_{1,3} + (l_2 + l_3 + \\
 &+ 2l_0) \ln t \left. \right\}, \\
 X_{II} &= \frac{\pi \cdot 10^{-7}}{2} \left\{ L_2 + \frac{1}{n^2} \left[ -2(l_2 + l_0) L_0 + \right. \right. \\
 &+ (l_2 - l_3 + 2l_0) C_{1,2} + (l_2 + l_3 + 2l_0) \ln t \left. \right\}, \\
 X_{III} &= \frac{\pi \cdot 10^{-7}}{2} \left\{ L_3 + \frac{1}{n^2} \left[ -2(l_3 + l_0) L_0 + \right. \right. \\
 &+ (l_3 + l_0) (C_{1,2} + C_{1,3}) + 2(l_3 + l_0) \ln t \left. \right\}.
 \end{aligned} \tag{V.36}$$

в) Трехфазный трубчатый пакет с равными длинами фаз (рис. I.8, в, V.11) и сечением (рис. V.10, а)

$$\left. \begin{aligned} X_I = X_{III} &= \pi l 10^{-7} \left[ \frac{1}{n^2} (S_{1,2} + C_{1,3} - 2L_0) + \right. \\ &\left. + 2 \ln t \right], \\ X_{II} &= 2\pi l 10^{-7} \left[ \frac{1}{n^2} (S_{1,2} - L_0) + \ln t \right]. \end{aligned} \right\} \quad (V.37)$$

г) Трехфазный трубчатый пакет с равными длинами фаз (рис. I.8, в; V.11) и сечением, изображенным на рис. V.10, б

$$\left. \begin{aligned} X_I = X_{III} &= \pi l 10^{-7} \left[ \frac{1}{n^2} (C_{1,2} + C_{1,3} - \right. \\ &\left. - 2L_0) + 2 \ln t \right], \\ X_{II} &= 2\pi l 10^{-7} \left[ \frac{1}{n^2} (C_{1,2} - L_0) + \ln t \right]. \end{aligned} \right\} \quad (V.38)$$

д) Трехфазный трубчатый пакет, изображенный на рис. I.2, б. Сечение (рис. V.10, а):

$$\left. \begin{aligned} X_I = X_{III} &= \frac{\pi \cdot 10^{-7}}{8} \left\{ L_4 + \frac{1}{n^2} [2(l_3 + \right. \\ &+ l_0) S_{1,2} + (2l_0 + 3l_3 - l_1) C_{1,3} - 4(l_2 + \\ &+ l_0) L_0] + (5l_3 - l_1 + 4l_0) \ln t \right\}, \\ X_{II} &= \frac{\pi \cdot 10^{-7}}{2} \left\{ L_2 + \frac{1}{n^2} [ - (l_2 + l_0) L_0 + \right. \\ &+ (l_3 + l_0) S_{1,2} ] + (l_3 + l_0) \ln t \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (V.39)$$

е) Трехфазный трубчатый пакет с равными длинами фаз ( $l_1 = l_2 = l_3 = l$ ) (рис. I.6, б) и сечением, изображенным на рис. V.10, в [27]

$$\left. \begin{aligned} X_I = X_{III} &= \pi l 10^{-7} \left\{ \frac{1}{4n^2} [3(S_{1,2} + C_{1,3}) - \right. \\ &- 4(L_0 + S_{1,4}) + C_{1,5} + S_{1,6}] + \ln t \right\}, \\ X_{II} &= \pi l 10^{-7} \left\{ \frac{1}{4n^2} [2(2S_{1,2} + C_{1,3} + C_{1,5}) - \right. \\ &- 4(L_0 + S_{1,4})] + \ln t \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (V.40)$$

Рис. V.11. Схема соединения короткой сети компенсированная звезда

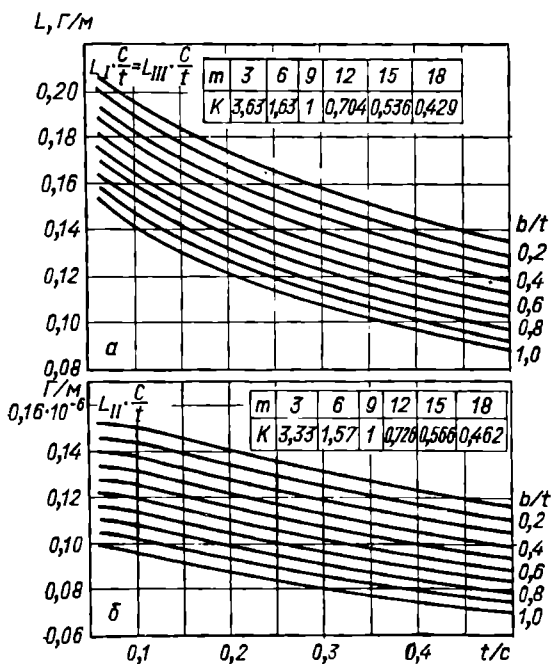
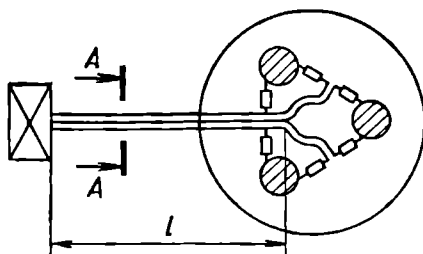


Рис. V.12. Кривая для определения индуктивности трехфазного шинного пакета



В формулах (V.35) и (V.40)

$$L_0 = S_0 + n \ln g_{1,1} + n(n-1) \ln t, \quad (\text{V.41})$$

С. г. р. площади поперечного сечения проводника от самой себя  $g_{1,1}$  определяется по формуле (V.11):

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= l_1 (\ln 2l_1 - 1) - \frac{1}{2} l_2 (\ln 2l_2 - 1) - \\ &- \frac{1}{2} l_3 (\ln 2l_3 - 1) + \frac{1}{2} (l_1 - l_2) [\ln 2 (l_1 - \\ &- l_2) - 1] + \frac{1}{2} (l_1 - l_3) [\ln 2 (l_1 - l_3) - 1], \\ L_2 &= l_2 (\ln 2l_2 - 1) - \frac{1}{2} l_1 (\ln 2l_1 - 1) - \\ &- \frac{1}{2} l_3 (\ln 2l_3 - 1) + \frac{1}{2} (l_2 - l_3) [\ln 2 (l_2 - \\ &- l_3) - 1] + \frac{1}{2} (l_1 - l_2) [\ln 2 (l_1 - l_2) - 1], \\ L_3 &= l_3 (\ln 2l_3 - 1) - \frac{1}{2} l_1 (\ln 2l_1 - 1) - \\ &- \frac{1}{2} l_2 (\ln 2l_2 - 1) + \frac{1}{2} (l_1 - l_3) [\ln 2 (l_1 - \\ &- l_3) - 1] - \frac{1}{2} (l_2 - l_3) [\ln 2 (l_2 - l_3) - 1], \\ L_4 &= l_1 (\ln 2l_1 - 1) - 2l_2 (\ln 2l_2 - 1) + \\ &+ l_3 (\ln 2l_3 - 1) + 2 (l_1 - l_2) [\ln 2 (l_1 - l_2) - \\ &- 1] + 2 (l_1 - l_2) [\ln 2 (l_1 - l_3) - 1]. \end{aligned} \right\} \quad (\text{V.42})$$

$S_0$ ;  $S_{1,m}$ ;  $C_{1,m}$  — табулированные функции (табл. 5.7, 5.8, 5.9):

$$S_0 = \sum_{i=1}^n 2(n-i) \ln i;$$

$$S_{1,m} = \sum_{i=1}^n [2(n-i) + 1] \ln \sqrt{[(m-1)\alpha]^2 + \beta^2 (2i-1)^2}$$

$$C_{1,m} = n \ln (m-1)\alpha + \sum_{i=1}^n (n-i) \ln \{[(m-1)\alpha]^2 + i^2\}.$$

В табл. 5.7 также приведены значения  $S_{1,1}$ ;  $S'_0$ , которые встречаются в формулах (V.45) и (V.54).

| $n$ | $S_0$   | $S_{1,1}$ | $S'_0$  | $n$ | $S_0$    | $S_{1,1}$ | $S'_0$  |
|-----|---------|-----------|---------|-----|----------|-----------|---------|
| 1   | 0,0000  | -0,6931   | —       | 9   | 72,3189  | 63,0044   | —       |
| 2   | 0,0000  | -1,6740   | 0,0000  | 10  | 97,9226  | 87,4896   | -1,4164 |
| 3   | 1,3863  | -1,3330   | —       | 11  | 128,1314 | 116,5775  | —       |
| 4   | 4,9698  | 1,1769    | -0,2877 | 12  | 163,1360 | 150,4591  | —       |
| 5   | 11,3259 | 6,4438    | —       | 13  | 203,1105 | 189,3088  | —       |
| 6   | 20,9009 | 14,9194   | -0,6399 | 14  | 248,2148 | 233,2869  | —       |
| 7   | 34,0594 | 26,9716   | —       | 15  | 298,5972 | 282,5419  | —       |
| 8   | 51,1097 | 42,9105   | -1,0203 | 16  | 354,3958 | 337,2118  | —       |

По табл. 5.8 определяются  $S_{1,2}; S_{1,3} \dots S_{1,m}$  при  $\beta = \text{const} = 0,5$ .

По табл. 5.9 определяются  $C_{1,2}; C_{1,3} \dots C_{1,m}$  при  $\beta = \text{const} = 0$ .

Кроме вышеприведенных формул для расчета индуктивностей трехфазных пакетов могут служить нормали, приведенные в работе [28].

Пример 1. Найти реактивное сопротивление отдельных фаз трубчатого пакета короткой сети, изображенной на рис. 1.9, а, сечение которого представлено на рис. V.10, а при  $n=12$ ,  $t=11,0$  см,  $\alpha_{1,2}=3,74$  см,  $\beta t=5,5$  см,  $d=5,0$  см,  $\delta=1,0$  см,  $l_0=390$  см,  $l_1=980$  см,  $l_2=720$  см,  $l_3=460$  см,  $p=260$  см.

Сопротивления фаз находятся по формуле (V.35).

Из табл. 5.3  $g_{11}=2,1945$ .

Из табл. 5.7  $S_0=163,136$ .

Из табл. 5.8,  $S_{1,2}=155,713$  ( $\alpha_{1,2}=37,4/110=0,34$ ).

Из табл. 5.9  $C_{1,3}=164,76$  ( $\alpha_{1,3}=37,4/110 \cdot 2=0,68$ ).

По формулам (V.41) и (V.42)

$$L_0 = 163,136 + 12 \ln 2,1945 + 12(12-1) \ln 11 = 489,093.$$

$$L_1 = 980 [\ln (2 \cdot 980) - 1] - \frac{1}{2} 720 [\ln (2 \cdot 720) - 1] -$$

$$- \frac{1}{2} 460 [\ln (2 \cdot 460) - 1] + \frac{1}{2} (980 - 720) [\ln 2 (980 - 720) - 1] + \frac{1}{2} (980 - 460) [\ln 2 (980 - 460) - 1] = 5090 \text{ см}.$$

$$L_2 = 720 [\ln (2 \cdot 720) - 1] - \frac{1}{2} 980 [\ln (2 \cdot 980) - 1] -$$

$$- \frac{1}{2} 460 [\ln (2 \cdot 460) - 1] + \frac{1}{2} (720 - 460) [\ln 2 (720 - 460) -$$

ЗНАЧЕНИЯ  $S_1, m$ 

| $\alpha_1, m$ | Значения $S_1, m (m = 2, 3, \dots, m)$ |         |         |         |          |          |          |          |
|---------------|----------------------------------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|
|               | $n = 2$                                | $n = 4$ | $n = 6$ | $n = 8$ | $n = 10$ | $n = 12$ | $n = 14$ | $n = 16$ |
| 0,25          | -1,32556                               | 2,04390 | 16,3232 | 44,8585 | 89,9859  | 153,506  | 236,887  | 341,365  |
| 0,30          | -1,19314                               | 2,37628 | 16,8635 | 45,6101 | 90,9505  | 154,685  | 238,280  | 342,974  |
| 0,32          | -1,13676                               | 2,51830 | 17,0948 | 45,9321 | 91,3640  | 155,190  | 238,878  | 343,665  |
| 0,34          | -1,07881                               | 2,66465 | 17,3333 | 46,2655 | 91,7909  | 155,713  | 239,496  | 344,378  |
| 0,36          | -1,01949                               | 2,81478 | 17,5784 | 46,6059 | 92,2299  | 156,249  | 240,131  | 345,113  |
| 0,38          | -1,95902                               | 2,96822 | 17,8291 | 46,9556 | 92,6795  | 156,800  | 240,782  | 345,865  |
| 0,40          | -0,89758                               | 3,12451 | 18,0847 | 47,3125 | 93,1386  | 157,362  | 241,448  | 346,634  |
| 0,425         | -0,81970                               | 3,32325 | 18,4102 | 47,7673 | 93,7240  | 158,078  | 242,296  | 347,615  |
| 0,45          | -0,74089                               | 3,52504 | 18,7413 | 48,2302 | 94,3202  | 158,809  | 243,161  | 348,615  |
| 0,475         | -0,66144                               | 3,72925 | 19,0769 | 48,7000 | 94,9255  | 159,551  | 244,041  | 349,632  |
| 0,50          | -0,58158                               | 3,93528 | 19,4161 | 49,1752 | 95,5384  | 160,302  | 244,931  | 350,663  |
| 0,55          | -0,4212                                | 4,35086 | 20,1021 | 50,1377 | 96,7809  | 161,827  | 246,740  | 352,756  |
| 0,60          | -0,26177                               | 5,76846 | 20,7940 | 51,1107 | 98,0387  | 163,372  | 248,573  | 354,879  |
| 0,65          | -0,10362                               | 5,18561 | 21,1807 | 52,0886 | 99,3046  | 164,928  | 250,422  | 357,022  |
| 0,70          | -0,05332                               | 5,60049 | 22,1807 | 53,0672 | 100,573  | 166,490  | 252,278  | 359,174  |
| 0,75          | 0,20558                                | 6,01180 | 22,8703 | 54,0436 | 101,841  | 168,052  | 254,137  | 361,331  |
| 0,80          | 0,35583                                | 6,41861 | 23,5552 | 55,0156 | 103,105  | 169,611  | 255,994  | 363,487  |
| 0,85          | 0,50287                                | 6,82029 | 24,2343 | 55,9817 | 104,364  | 171,165  | 257,846  | 365,638  |
| 0,90          | 0,64661                                | 7,21642 | 24,9068 | 56,9407 | 105,615  | 172,712  | 259,691  | 367,783  |
| 0,95          | 0,78700                                | 7,60676 | 25,5722 | 57,8919 | 106,858  | 174,250  | 261,527  | 369,919  |
| 1,00          | 0,92404                                | 7,99114 | 26,2303 | 58,8348 | 108,092  | 175,780  | 263,354  | 372,046  |
| 1,10          | 1,18829                                | 8,74189 | 27,5235 | 60,6946 | 110,531  | 178,808  | 266,976  | 376,267  |
| 1,20          | 1,43991                                | 9,46883 | 28,7860 | 62,5188 | 112,932  | 181,794  | 270,554  | 380,442  |
| 1,30          | 1,67962                                | 10,1726 | 30,0181 | 64,3075 | 115,293  | 184,737  | 274,087  | 384,569  |

|      |         |         |         |         |         |         |         |         |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1,40 | 1,90822 | 10,8541 | 31,2206 | 66,0612 | 117,615 | 187,638 | 277,575 | 388,649 |
| 1,50 | 2,12647 | 11,5144 | 32,3944 | 67,7809 | 119,898 | 190,497 | 281,018 | 392,681 |
| 1,60 | 2,33513 | 12,1544 | 33,5407 | 69,4675 | 122,145 | 193,316 | 284,416 | 396,667 |
| 1,70 | 2,53486 | 12,7751 | 34,6603 | 71,1221 | 124,355 | 196,094 | 287,773 | 400,608 |
| 1,80 | 2,72632 | 13,3774 | 35,7544 | 72,7458 | 126,529 | 198,834 | 291,087 | 404,504 |
| 1,90 | 2,91008 | 13,9623 | 36,8240 | 74,3394 | 128,670 | 201,536 | 294,361 | 408,356 |
| 2,00 | 3,08667 | 14,5306 | 37,8698 | 75,9041 | 130,777 | 204,201 | 297,594 | 412,167 |
| 2,20 | 3,42026 | 15,6205 | 39,8942 | 78,9502 | 134,896 | 209,425 | 303,946 | 419,664 |
| 2,40 | 3,73048 | 16,6528 | 41,8340 | 81,8908 | 138,892 | 214,512 | 310,150 | 427,002 |
| 2,60 | 4,02017 | 17,6326 | 43,6952 | 84,7324 | 142,772 | 219,470 | 316,212 | 434,188 |
| 2,80 | 4,29172 | 18,5644 | 45,4832 | 87,4805 | 146,543 | 224,304 | 322,138 | 441,229 |
| 3,0  | 4,54712 | 19,4522 | 47,2028 | 90,1405 | 150,209 | 229,020 | 327,935 | 448,129 |
| 3,2  | 4,78810 | 20,2995 | 48,8584 | 92,7172 | 153,776 | 233,623 | 333,607 | 454,894 |
| 3,4  | 5,01612 | 21,1095 | 50,4541 | 95,2149 | 157,248 | 238,118 | 339,159 | 461,530 |
| 3,6  | 5,23244 | 21,8851 | 51,9936 | 97,6379 | 160,630 | 242,509 | 344,596 | 468,039 |
| 3,8  | 5,43816 | 22,6287 | 53,4801 | 99,9899 | 163,925 | 246,800 | 349,922 | 474,428 |
| 4,0  | 5,63422 | 23,3428 | 54,9169 | 102,274 | 167,138 | 250,997 | 355,141 | 480,700 |
| 4,5  | 6,08739 | 25,0116 | 58,3092 | 107,712 | 174,831 | 261,092 | 367,745 | 495,893 |
| 5,0  | 6,49576 | 26,5354 | 61,4467 | 112,793 | 182,080 | 270,665 | 379,758 | 510,433 |
| 5,5  | 6,86721 | 27,9359 | 64,3617 | 117,558 | 188,927 | 279,761 | 391,226 | 524,368 |
| 6,0  | 7,20773 | 29,2305 | 67,0811 | 122,039 | 195,409 | 288,420 | 402,192 | 537,743 |
| 6,5  | 7,52200 | 30,4334 | 69,6275 | 126,265 | 201,559 | 296,676 | 412,692 | 550,594 |
| 7,0  | 7,81372 | 31,5562 | 72,0201 | 130,260 | 207,406 | 304,562 | 422,760 | 562,957 |
| 7,5  | 8,08587 | 32,6086 | 74,2751 | 134,047 | 212,976 | 312,105 | 432,426 | 574,863 |
| 8,0  | 8,34089 | 33,5984 | 76,4067 | 137,644 | 218,290 | 319,331 | 441,717 | 586,340 |
| 8,5  | 8,58078 | 34,5326 | 78,4268 | 141,068 | 223,369 | 326,263 | 450,658 | 597,416 |
| 9,0  | 8,80722 | 35,4168 | 80,3459 | 144,334 | 228,231 | 332,921 | 459,271 | 608,113 |
| 9,5  | 9,02163 | 36,2560 | 82,1733 | 147,454 | 232,892 | 339,323 | 467,577 | 618,454 |
| 10,0 | 9,22521 | 37,0544 | 83,9168 | 150,440 | 237,367 | 345,487 | 475,594 | 628,45  |

ЗНАЧЕНИЯ  $C_{1,m}$ 

| $\alpha_1, m$ | Значения $C_{1,m}$ ( $m = 2, 3, \dots, 16$ ) при различных $n$ |         |         |         |          |          |          |          |  |  |
|---------------|----------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|--|--|
|               | $n = 2$                                                        | $n = 4$ | $n = 6$ | $n = 8$ | $n = 10$ | $n = 12$ | $n = 14$ | $n = 16$ |  |  |
| 0,400         | -1,68416                                                       | 1,84597 | 16,3813 | 45,2128 | 90,6587  | 154,511  | 238,234  | 343,062  |  |  |
| 0,425         | -1,54529                                                       | 2,15348 | 16,8630 | 45,8712 | 91,4950  | 155,527  | 239,429  | 344,437  |  |  |
| 0,450         | -1,41261                                                       | 2,45001 | 17,3294 | 46,5099 | 92,3074  | 156,514  | 240,591  | 345,775  |  |  |
| 0,475         | -1,28543                                                       | 2,73691 | 17,7823 | 47,1315 | 93,0991  | 157,476  | 241,725  | 347,081  |  |  |
| 0,500         | -1,16315                                                       | 3,01530 | 18,2233 | 47,7381 | 93,8728  | 158,418  | 242,836  | 348,361  |  |  |
| 0,550         | -0,93139                                                       | 3,55018 | 19,0756 | 48,9136 | 95,3750  | 160,249  | 244,997  | 350,854  |  |  |
| 0,600         | -0,71417                                                       | 4,06054 | 19,8945 | 50,0478 | 96,8281  | 162,024  | 247,094  | 353,275  |  |  |
| 0,650         | -0,50915                                                       | 4,55063 | 20,6864 | 51,1487 | 98,2419  | 163,753  | 249,141  | 355,640  |  |  |
| 0,700         | -0,31457                                                       | 5,02357 | 21,4558 | 52,2221 | 99,6236  | 165,446  | 251,147  | 357,960  |  |  |
| 0,750         | -0,12908                                                       | 5,48172 | 22,2058 | 53,2722 | 100,979  | 167,108  | 253,119  | 360,243  |  |  |
| 0,800         | 0,04841                                                        | 5,92686 | 22,9390 | 54,3024 | 102,311  | 168,745  | 255,063  | 362,496  |  |  |
| 0,850         | 0,21874                                                        | 6,36037 | 23,6573 | 55,3149 | 103,622  | 170,360  | 256,983  | 364,723  |  |  |
| 0,900         | 0,38261                                                        | 6,78333 | 24,3622 | 56,3115 | 104,916  | 171,955  | 258,881  | 366,926  |  |  |
| 0,950         | 0,54058                                                        | 7,19661 | 25,0547 | 57,2937 | 106,194  | 173,532  | 260,760  | 369,108  |  |  |
| 1,00          | 0,69315                                                        | 7,60090 | 25,7358 | 58,2626 | 107,457  | 175,092  | 262,621  | 371,272  |  |  |
| 1,10          | 0,98361                                                        | 8,38474 | 27,0664 | 60,1635 | 109,941  | 178,169  | 266,295  | 375,548  |  |  |
| 1,20          | 1,25664                                                        | 9,13848 | 28,3584 | 62,0194 | 112,376  | 181,190  | 269,911  | 379,763  |  |  |
| 1,30          | 1,51427                                                        | 9,86481 | 29,6149 | 63,8338 | 114,762  | 184,162  | 273,473  | 383,920  |  |  |
| 1,40          | 1,75813                                                        | 10,5658 | 30,8385 | 65,6095 | 117,108  | 187,086  | 276,984  | 388,024  |  |  |
| 1,50          | 1,98959                                                        | 11,2434 | 32,0309 | 67,3485 | 119,411  | 189,965  | 280,447  | 392,077  |  |  |
| 1,60          | 2,20977                                                        | 11,8988 | 33,1938 | 69,0524 | 121,675  | 192,802  | 283,864  | 396,082  |  |  |
| 1,70          | 2,41966                                                        | 12,5336 | 34,3287 | 70,7227 | 123,901  | 195,596  | 287,237  | 400,039  |  |  |

|      |         |         |         |         |         |         |         |         |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1,80 | 2,62014 | 13,1488 | 35,4369 | 72,3609 | 126,091 | 198,351 | 290,567 | 403,950 |
| 1,90 | 2,81194 | 13,7455 | 36,5194 | 73,9682 | 128,245 | 201,067 | 293,854 | 407,817 |
| 2,00 | 2,99573 | 14,3247 | 37,5774 | 75,5455 | 130,366 | 202,745 | 297,101 | 411,641 |
| 2,20 | 3,34164 | 15,4342 | 39,6238 | 78,6147 | 134,508 | 203,993 | 303,477 | 419,162 |
| 2,40 | 3,66196 | 16,4884 | 41,5832 | 81,5760 | 138,525 | 214,102 | 309,703 | 426,522 |
| 2,60 | 3,96001 | 17,4781 | 43,4620 | 84,4363 | 142,425 | 219,079 | 315,784 | 433,728 |
| 2,80 | 4,23853 | 18,4231 | 45,2657 | 87,2014 | 146,213 | 223,931 | 321,729 | 440,787 |
| 3,00 | 4,49981 | 19,3225 | 46,9996 | 89,8769 | 149,895 | 228,664 | 327,543 | 447,704 |
| 3,20 | 4,74578 | 20,1801 | 48,6682 | 92,4678 | 153,477 | 233,282 | 333,230 | 454,485 |
| 3,40 | 4,97807 | 20,9994 | 50,2758 | 94,9787 | 156,963 | 237,791 | 338,797 | 461,135 |
| 3,60 | 5,19806 | 21,7833 | 51,8260 | 97,4139 | 160,358 | 242,196 | 344,247 | 467,659 |
| 3,80 | 5,40696 | 22,5344 | 53,3225 | 99,7771 | 163,665 | 246,500 | 349,586 | 474,061 |
| 4,00 | 5,60580 | 23,2552 | 54,7694 | 102,072 | 166,889 | 250,708 | 354,817 | 480,345 |
| 4,50 | 6,06451 | 24,9381 | 58,1806 | 107,533 | 174,608 | 260,830 | 367,449 | 495,565 |
| 5,00 | 6,47697 | 26,4730 | 61,3345 | 112,634 | 181,878 | 270,426 | 379,480 | 510,130 |
| 5,50 | 6,85152 | 27,8824 | 64,2632 | 117,416 | 188,744 | 279,542 | 390,974 | 524,087 |
| 6,00 | 7,19444 | 29,1842 | 66,9940 | 121,911 | 195,242 | 288,218 | 401,958 | 537,480 |
| 6,50 | 7,51060 | 30,3930 | 69,5501 | 126,149 | 201,407 | 296,490 | 412,476 | 555,349 |
| 7,00 | 7,80384 | 31,5207 | 71,9509 | 130,155 | 207,267 | 304,390 | 422,559 | 562,728 |
| 7,50 | 8,07723 | 32,5771 | 74,2130 | 133,952 | 212,848 | 311,946 | 432,239 | 574,648 |
| 8,00 | 8,33327 | 33,5705 | 76,3507 | 137,557 | 218,172 | 319,184 | 441,542 | 586,139 |
| 8,50 | 8,57401 | 34,5074 | 78,3761 | 140,989 | 223,260 | 326,126 | 450,494 | 597,226 |
| 9,00 | 8,80117 | 35,3942 | 80,2998 | 144,262 | 228,130 | 332,793 | 459,117 | 607,935 |
| 9,50 | 9,01619 | 36,2355 | 82,1312 | 147,387 | 232,799 | 339,204 | 467,432 | 618,286 |
| 10,0 | 9,22029 | 37,0358 | 83,8782 | 150,378 | 237,280 | 345,376 | 475,458 | 628,300 |

$$-1] + \frac{1}{2} (980 - 720) [\ln 2 (980 - 720) - 1] = 1320 \text{ см.}$$

$$L_3 = 460 [\ln (2 \cdot 460) - 1] - \frac{1}{2} 980 [\ln (2 \cdot 980) - 1] - \\ - \frac{1}{2} 720 [\ln (2 \cdot 720) - 1] + \frac{1}{2} (980 - 460) [\ln 2 (980 - 460) - 1] + \\ + \frac{1}{2} (720 - 460) [\ln 2 (720 - 460) - 1] = -576 \text{ см.}$$

Следовательно:

$$X_I = \frac{3,14 \cdot 10^{-7}}{2} \left\{ 5090 + \frac{1}{12^2} [-2 (980 + 390) 489,093 + (720 + \right. \\ \left. + 390) 155,713 + (460 + 390) 164,759] + (720 + 460 + \right. \\ \left. + 2 \cdot 390) \ln 11 \right\} = \frac{3,14 \cdot 10^{-7}}{2} (5090 - 7133 + 4700) = 0,417 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

$$X_{II} = \frac{3,14 \cdot 10^{-7}}{2} \left\{ 1320 + \frac{1}{12^2} [-2 (720 + 390) 489,093 + \right. \\ \left. + (720 + 460 + 2 \cdot 390) 155,713] + (720 + 460 + 2 \cdot 390) \ln 11 \right\} = \\ = \frac{3,14 \cdot 10^{-7}}{2} (1320 - 5421 + 4700) = 0,094 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

$$X_{III} = \frac{3,14 \cdot 10^{-7}}{2} \left\{ -576 + \frac{1}{12^2} [-2 (460 + 390) 489,093 + \right. \\ \left. + (460 + 390) 155,713 + (460 + 390) 164,759] + 2 (460 + \right. \\ \left. + 390) \ln 11 \right\} = \frac{3,14 \cdot 10^{-7}}{2} (-576 - 3882 + 4076) = \\ = -0,060 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

ж) Трехфазный пакет шин (рис. I.2, а, I.8, в, сечение, рис. V.2, б) при  $l_1 = l_2 = l_3 = l$ :

$$X_I = X_{III} = 2\pi f \left\{ \frac{m}{3} L - \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{m/3-1} \left[ \frac{2m}{3} - (2i + \right. \right. \\ \left. \left. + 1) \right] [M_{1,(2+3i)} + M_{1,(3+3i)}] + \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^{m/3} 2 \left( \frac{m}{3} - i \right) M_{1,(3i+1)} \right\} \frac{9}{m^2}, \quad (V.43)$$

$$X_{II} = 2\pi f \left\{ \frac{m}{3} L - \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{m/3-1} 2 \left( \frac{m}{3} - i \right) \times \right. \\ \times M_{1,(2+3i)} - \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{m/3-1} 2 \left[ \frac{m}{3} - (i+1) \right] \times \\ \left. \times M_{1,(3+3i)} + \sum_{i=1}^{m/3} 2 \left( \frac{m}{3} - i \right) M_{1,(3i+1)} \right\} \frac{9}{m^2}.$$

где  $L$  — собственная индуктивность шины;  $M$  — взаимная индуктивность между соответствующими шинами пакета (определяются по формуле (V.33)).

Упрощение расчетов может быть достигнуто с помощью применения кривых (рис. V.12), на которых индуктивности  $L_I = L_{III}$  и  $L_{II}$ , отнесенные к величине  $t/c$ , даны в зависимости от параметров  $b/t$  и  $t/c$  для  $m=9$ . На этих же рисунках приведены значения коэффициента  $K$  для расчета реактивных сопротивлений фаз пакета при  $m=3, 6, 9, \dots 18$ .

$$\left. \begin{aligned} X_I &= X_{III} = 2\pi f L_I K l \cdot 10^{-2}; \\ X_{II} &= 2\pi f L_{II} K l \cdot 10^{-2}. \end{aligned} \right\} \quad (V.44)$$

**Пример 2.** Определить индуктивность отдельных фаз трехфазного пакета шин (рис. V.2, б) при  $m=6$ ,  $b=1,0$  см,  $c=10,0$  см,  $t=2,0$  см,  $l=500$  см.

Решение по формулам:

По формуле (V.12):

$$g_{1,1} = 0,2236 (1 + 10) = 2,453 \text{ см.}$$

Значения  $L$  и  $M$  определяются по формуле (V.6) и (V.33) и табл. 5.2 и 5.4.

Результаты расчетов приведены в табл. 5.10.

ТАБЛИЦА 5.10

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

| № шин | $g_{1,i}$ , см | $\frac{g_{1,i}}{l}$ | $F$     | $L (M) \cdot 10^{-9}$ , Г |
|-------|----------------|---------------------|---------|---------------------------|
| 1,1   | 2,45           | 0,0049              | 10,0331 | 5016                      |
| 1,2   | 3,69           | 0,0074              | 9,2136  | 4607                      |
| 1,3   | 5,31           | 0,0106              | 8,5012  | 4251                      |
| 1,4   | 7,05           | 0,0141              | 7,9376  | 3969                      |
| 1,5   | 8,87           | 0,0177              | 7,4899  | 3745                      |
| 1,6   | 10,73          | 0,0214              | 7,1176  | 3559                      |



Реактивное сопротивление фаз находят по формулам (V.43):

$$X_I = X_{III} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10^{-9} \left\{ 2 \cdot 5016 - \frac{1}{2} [(4-1)(4607 + 4251) + (4-3)3745 + 3559] + 2(2-1)3969 \right\} \frac{9}{36} = 0,081 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

$$X_{II} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10^{-9} \left[ 2 \cdot 5016 - \frac{1}{2} (4 \cdot 4607 + 2 \cdot 3745) - \frac{1}{2} (2 \cdot 4251) + 2 \cdot 3969 \right] \frac{9}{36} = 0,06 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Решение по нормалам:

Сопротивления фаз определяются по формуле (V.44):

Из рис. V.12 находим  $L_1 = 0,0292 \cdot 10^{-2}$  Г/м,  $K = 1,63$ ;  $L_2 = 0,23 \times 10^{-6}$  Г/м,  $K = 1,57$ .

Следовательно:

$$X_I = X_{III} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,0292 \cdot 10^{-6} \cdot 1,63 \cdot 500 \cdot 10^{-2} = 0,075 \cdot 10^{-3} \text{ Ом;}$$

$$X_{II} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,023 \cdot 1,57 \cdot 500 \cdot 10^{-2} = 0,057 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Треугольник на электродах

а) Печь с прямоугольной ванной (рис. I.9, б); проводники трубчатого пакета перешихтованы по системе *yabzcx*. Сечение пакета (рис. V.10, з).

$$\left. \begin{aligned} X_I = X_{ax} &= \frac{\pi \cdot 10^{-7}}{2} \left\{ L_A + \frac{1}{n^2} [-2(l_2 + l_5)L_0 + (3l_2 - l_5)Q_{1,2} - (l_1 + l_3)S_{1,3} + l_3S_{1,1} + l_2Q'_{1,2} + l_4C_{1,4} + l_1Q_{1,4}] + 2(3l_2 - l_3) \ln t \right\}, \\ X_{II} = X_{by} &= \frac{\pi \cdot 10^{-7}}{2} \left\{ L_B + \frac{1}{n^2} [-2(l_1 + l_3)L_0 + (5l_1 + l_3)Q_{1,2} - (l_3 + l_1)S_{1,3} - l_3S_{1,1} + l_2Q'_{1,2} - l_1(C_{1,3} - Q_{1,4})] + (4l_1 - l_3 + l_2) \ln t \right\}, \\ X_{III} = X_{cz} &= \frac{\pi \cdot 10^{-7}}{2} \left\{ L_B + \frac{1}{n^2} [-2(l_4 + l_6)L_0 + (-2l_1 + 3l_2 + 3l_3)Q_{1,2} + (l_2 - l_3)S_{1,1} + (l_4 - l_1)C_{1,3}] + (5l_4 - l_5) \ln t \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (V.45)$$

В формуле (V.45)  $L_0$  находится по формуле (V.41), а  $L_B$  определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} L_A &= 2(l_5 - l_2) [\ln 2(l_5 - l_2) - 1] - (l_6 - \\ &- l_5) [\ln 2(l_6 - l_5) - 1] + (l_5 - l_4) [\ln 2(l_5 - \\ &- l_4) - 1] - (l_5 - l_3) [\ln 2(l_5 - l_3) - 1] + \\ &+ (l_6 - l_2) [\ln 2(l_6 - l_2) - 1], \\ L_B &= 2(l_6 - l_4) [\ln 2(l_6 - l_4) - 1] - (l_6 - l_5) \times \\ &\times [\ln 2(l_6 - l_5) - 1] + (l_6 - l_3) [\ln 2(l_6 - \\ &- l_3) - 1] + \frac{1}{2}(l_6 - l_2) [\ln 2(l_6 - l_2) - 1] - \\ &- \frac{1}{2}(l_6 - l_1) [\ln 2(l_6 - l_1) - 1] + \frac{1}{2}(l_5 - \\ &- l_4) [\ln 2(l_5 - l_4) - 1] - \frac{1}{2}(l_4 - l_2) \ln 2(l_4 - \\ &- l_2) - 1], \end{aligned} \right\} \quad (V.46)$$

и  $Q_{1,m}$ ;  $Q'_{1,2}$  — табулированные функции (табл. 5.7—5.9)

$$S_{1,1} = \sum_{i=1}^n [2n - (2i - 1)] \ln \frac{2i - 1}{2}; \quad (V.47)$$

$$\begin{aligned} Q'_{1,2} &= \sum_{i=0}^{n-1} (n - i) \ln \sqrt{\alpha^2 + [(i + 1) - \beta]^2} + \\ &+ \sum_{i=1}^{n-1} [n - (i + 1)] \ln \sqrt{\alpha^2 + (i + \beta)^2}; \end{aligned} \quad (V.48)$$

$$\begin{aligned} Q_{1,m} &= \sum_{i=0}^{n-1} (n - i) \ln \sqrt{[(m - 1)\alpha]^2 + (i - \beta)^2} + \\ &+ \sum_{i=0}^n (n - i) \ln \sqrt{[(m - 1)\alpha]^2 + (i + \beta)^2}. \end{aligned}$$

ЗНАЧЕНИЯ  $Q_{1,m}$ ,  $Q'_{1,2}$  ПРИ РАЗЛИЧНЫХ  $n$ 

| $\alpha_{1,2; 1,m}$ | $n=6$     |            | $n=8$     |            | $n=10$    |            |
|---------------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
|                     | $Q_{1,m}$ | $Q'_{1,2}$ | $Q_{1,m}$ | $Q'_{1,2}$ | $Q_{1,m}$ | $Q'_{1,2}$ |
| 0,20                | 13,9472   | 15,7070    | 41,8212   | 43,7245    | 86,2978   | 88,3126    |
| 0,25                | 14,7037   | 16,3780    | 42,8498   | 44,6676    | 87,6000   | 89,5292    |
| 0,30                | 15,4919   | 17,0839    | 43,9248   | 45,6592    | 88,9635   | 90,8093    |
| 0,35                | 16,2911   | 17,8035    | 45,0182   | 46,6740    | 90,3533   | 92,1204    |
| 0,40                | 17,0896   | 18,5294    | 46,1145   | 47,6974    | 91,7497   | 93,4439    |
| 0,45                | 17,8815   | 19,2546    | 47,2053   | 48,7215    | 93,1421   | 94,7695    |
| 0,50                | 18,6635   | 19,9759    | 48,2862   | 49,7415    | 94,5250   | 96,0915    |
| 0,60                | 20,1935   | 21,4000    | 50,4117   | 51,7608    | 97,2530   | 98,7131    |
| 0,70                | 21,6767   | 22,7948    | 52,4857   | 53,7459    | 99,9260   | 101,297    |
| 0,80                | 23,1149   | 24,1579    | 54,5091   | 55,6939    | 102,544   | 103,840    |
| 0,90                | 24,5106   | 25,4891    | 56,4846   | 57,6043    | 105,110   | 106,340    |

Пример 3. Найти реактивное сопротивление отдельных фаз трубчатого пакета короткой сети, изображенной на рис. 1.9, б, сечение которого представлено на рис. V.10, г при системе шихтовки *yabzxc* при  $n=8$ ,  $t=22,0$  см,  $\alpha_{1,2}t=5,5$  см,  $\beta t=5,5$  см,  $d=5,0$  см,  $\delta=1,0$  см,  $l_1=450$  см,  $l_2=560$  см,  $l_3=660$  см,  $l_4=770$  см,  $l_5=870$  см,  $l_6=980$  см,  $p=100$  см,  $a=110$  см.

Сопротивление фаз находится по формуле (V.45)

Из табл. 5.10  $g_{11}=2,1945$ .

Из табл. 5.7  $S_0=51,1097$ ;  $S_{1,1}=42,9110$ .

Из табл. 5.8  $S_{1,3}=49,1752$  при  $\alpha_{1,3} = \frac{55}{220} 2 = 0,5$ .

Из табл. 5.9  $C_{1,3}=47,7381$  при  $\alpha_{1,3} = \frac{55}{220} 2 = 0,5$ .

Из табл. 5.10  $Q_{1,2}=42,8498$  при  $\alpha_{1,2} = \frac{55}{220} = 0,25$ .

$Q'_{1,2} = 44,6676$  при  $\alpha_{1,2} = \frac{55}{220} = 0,25$ .

$Q_{1,4} = 53,4964$  при  $\alpha_{1,4} = \frac{55}{220} 3 = 0,75$ .

По формуле (V.41)

$L_0 = 51,1090 + 8 \ln 2,1945 + 8(8-1) \ln 22 = 230,4946$ .

По формуле (V.46)

$L_A = 2(870-560) [\ln 2(870-560) - 1] - (980-870) [\ln 2(980-870) - 1] + (870-770) [\ln 2(870-770) - 1] - (870-660) [\ln 2(870-660) - 1] + (980-560) \ln 2(980-560) - 1] = 4662$ .

$$L_B = 2 (980 - 770) [\ln 2 (980 - 770) - 1] - (980 - 870) [\ln 2 (980 - 870) - 1] + (980 - 660) [\ln 2 (980 - 660) - 1] + \frac{1}{2} (980 - 560) [\ln 2 (980 - 560) - 1] - \frac{1}{2} (980 - 450) [\ln 2 (980 - 450) - 1] + \frac{1}{2} (870 - 770) [\ln 2 (870 - 770) - 1] - \frac{1}{2} (770 - 560) [\ln 2 (770 - 560) - 1] = 2690.$$

Следовательно:

$$X_I = \frac{3,14 \cdot 10^{-7}}{2} \left\{ 4662 + \frac{1}{8^2} [-2 (560 + 870) \cdot 230,4946 + (3 \cdot 560 - 870) 42,8498 - (450 + 660) 49,1752 + 560 \cdot 42,9110 + 560 \cdot 44,6676 + 770 \cdot 47,7381 + 450 \cdot 53,4964] + 2 (3 \cdot 560 - 660) \ln 22 \right\} = 0,326 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

$$X_{II} = \frac{3,14 \cdot 10^{-7}}{2} \left\{ 2690 + \frac{1}{8^2} [-2 (450 + 660) 230,4946 + (5 \cdot 450 + 660) 42,8498 - (660 + 450) 49,1752 - 660 \cdot 42,9110 + 560 \cdot 44,6676 - 450 (47,7381 - 53,4964)] + (4 \cdot 450 - 660 + 560) \ln 22 \right\} = 0,162 \cdot 10^{-3} \text{ Ом;}$$

$$X_{III} = \frac{3,14 \cdot 10^{-7}}{2} \left\{ 2690 + \frac{1}{8^2} [-2 (770 + 980) 230,4946 + (-2 \cdot 450 + 3 \cdot 560 + 3 \cdot 660) 42,8498 + (560 - 660) 42,9110 + (770 - 450) 47,7381] + (5 \cdot 770 - 870) \ln 22 \right\} = 0,206 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Однофазный пакет (рис. 1.5, а, 1.5, б):

1) трубчатый пакет (рис. V.10, д, е):

$$X = \frac{16\pi \cdot 10^{-7} l}{m^2 n^2} \left\{ \frac{m}{2} \left[ n \ln \frac{t}{g_{1,1}} - S_0 \right] + \sum_{i=0}^{m-2} (i+1) (-1)^i K_{1,(m-i)} \right\}; \quad (V.49)$$

для сечения рис. V.10, д

$$K_{1,(m-i)} = C_{1,(m-i)} \text{ (см. табл. 5.9)}$$

для сечения рис. V.10, е

$$K_{1,(m-i)} = S_{1,(m-i)} \text{ при } i = 0, 2, 4, 6 \text{ (табл. 5.8)}$$

$$K_{1,(m-i)} = C_{1,(m-i)} \text{ при } i = 1, 3, 5, 7 \text{ (табл. 5.9)}$$

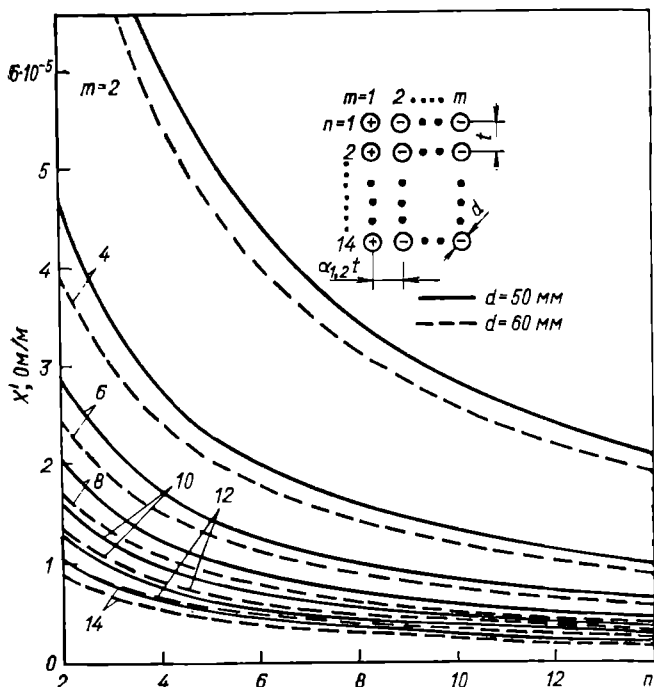


Рис. V.13.  $X'=f(n, m)$  в формуле (V.49) для трубчатого пакета с сечением по рис. V.10,  $\partial$

Для определения реактивного сопротивления трубчатого пакета могут также служить нормали (рис. V.13, рис. V.14) и формула

$$X = X' K_z l \cdot 10^{-2}, \quad (V.50)$$

где  $X'$  определяют из рис. V.13 (сечение (рис. V.10,  $\partial$ ) и рис. 14 (сечение (V.10,  $e$ )).

Для сечения рис. V.10,  $\partial$

$$K_z = K_1 - \Delta_1 (14 - m). \quad (V.51)$$

Для сечения рис. V.10,  $e$

$$K_z = K_2 - \Delta_2 (14 - m). \quad (V.52)$$

Значения  $K_1$  и  $\Delta_1$  в формуле (V.51) определяются из табл. 5.12, а значения  $K_2$  и  $\Delta_2$  в формуле (V.52) определяются из табл. 5.13 и являются функцией  $t$ ,  $n$ ,  $\alpha_{1,2}$  и  $d$ .

ЗНАЧЕНИЯ  $K_1$ ,  $\Delta_1$  В ФОРМУЛЕ (V.51)

|          |                | Значения $K_1$ , $\Delta_1$ при различных $n$ |       |            |       |            |       |            |        |            |        |            |  |
|----------|----------------|-----------------------------------------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|--------|------------|--------|------------|--|
| $t$ , мм | $\alpha_{1,2}$ | $d$ , мм                                      | $n=2$ |            | $n=4$ |            | $n=6$ |            | $n=10$ |            | $n=14$ |            |  |
|          |                |                                               | $K_1$ | $\Delta_1$ | $K_1$ | $\Delta_1$ | $K_1$ | $\Delta_1$ | $K_1$  | $\Delta_1$ | $K_1$  | $\Delta_1$ |  |
| 80       | 0,8            | 50                                            | 0,760 | -0,002     | 0,763 | -0,002     | 0,767 | -0,001     | 0,771  | 0          | 0,772  | 0          |  |
|          |                | 60                                            | 0,709 | -0,004     | 0,722 | -0,003     | 0,730 | -0,002     | 0,739  | -0,001     | 0,743  | 0          |  |
|          | 0,9            | 50                                            | 0,884 | -0,001     | 0,884 | -0,001     | 0,885 | 0          | 0,888  | 0          | 0,888  | 0          |  |
|          |                | 60                                            | 0,859 | -0,001     | 0,864 | -0,001     | 0,868 | -0,001     | 0,872  | -0,001     | 0,874  | 0          |  |
|          | 1,0            | 50                                            | 1     | 0          | 1     | 0          | 1     | 0          | 1      | 0          | 1      | 0          |  |
|          |                | 60                                            | 1     | 0          | 1     | 0          | 1     | 0          | 1      | 0          | 1      | 0          |  |
| 100      | 0,8            | 50                                            | 0,952 | 0          | 0,926 | 0,001      | 0,916 | 0,001      | 0,905  | 0,002      | 0,896  | 0,002      |  |
|          |                | 60                                            | 0,942 | 0          | 0,914 | 0,001      | 0,903 | 0,002      | 0,891  | 0,002      | 0,883  | 0,002      |  |
|          | 0,9            | 50                                            | 1,076 | 0,002      | 1,048 | 0,002      | 1,035 | 0,002      | 1,021  | 0,002      | 1,013  | 0,002      |  |
|          |                | 60                                            | 1,092 | 0,002      | 1,056 | 0,002      | 1,041 | 0,003      | 1,024  | 0,003      | 1,014  | 0,002      |  |
|          | 1,0            | 50                                            | 1,193 | 0,003      | 1,164 | 0,003      | 1,150 | 0,003      | 1,134  | 0,002      | 1,125  | 0,002      |  |
|          |                | 60                                            | 1,232 | 0,005      | 1,192 | 0,004      | 1,173 | 0,004      | 1,151  | 0,003      | 1,140  | 0,002      |  |
| 120      | 0,8            | 50                                            | 1,108 | 0,003      | 1,060 | 0,004      | 1,038 | 0,004      | 1,014  | 0,004      | 0,998  | 0,004      |  |
|          |                | 60                                            | 1,131 | 0,004      | 1,071 | 0,005      | 1,044 | 0,004      | 1,015  | 0,005      | 0,998  | 0,004      |  |
|          | 0,9            | 50                                            | 1,233 | 0,004      | 1,182 | 0,005      | 1,158 | 0,005      | 1,130  | 0,004      | 1,114  | 0,004      |  |
|          |                | 60                                            | 1,281 | 0,006      | 1,213 | 0,006      | 1,182 | 0,006      | 1,148  | 0,006      | 1,129  | 0,004      |  |
|          | 1,0            | 50                                            | 1,349 | 0,006      | 1,298 | 0,006      | 1,272 | 0,005      | 1,243  | 0,004      | 1,226  | 0,004      |  |
|          |                | 60                                            | 1,421 | 0,009      | 1,350 | 0,008      | 1,314 | 0,007      | 1,276  | 0,005      | 1,255  | 0,005      |  |

ЗНАЧЕНИЯ  $K_2$ ,  $\Delta_2$  В ФОРМУЛЕ (V.52)

| $t$ , мм | $\alpha_{1,2}$ | $d$ , мм | Значения $K_2$ и $\Delta_2$ при различных $n$ |            |       |            |        |            |
|----------|----------------|----------|-----------------------------------------------|------------|-------|------------|--------|------------|
|          |                |          | $n=4$                                         |            | $n=8$ |            | $n=12$ |            |
|          |                |          | $K_2$                                         | $\Delta_2$ | $K_2$ | $\Delta_2$ | $K_2$  | $\Delta_2$ |
| 80       | 0,3            | 50       | 0,691                                         | 0,023      | 0,551 | 0,018      | 0,486  | 0,015      |
|          |                | 60       | 0,647                                         | 0,026      | 0,495 | 0,019      | 0,427  | 0,016      |
|          | 0,4            | 50       | 0,651                                         | 0,015      | 0,555 | 0,012      | 0,508  | 0,010      |
|          |                | 60       | 0,601                                         | 0,016      | 0,500 | 0,013      | 0,450  | 0,011      |
|          | 0,5            | 50       | 0,670                                         | 0,009      | 0,603 | 0,009      | 0,568  | 0,008      |
|          |                | 60       | 0,624                                         | 0,010      | 0,554 | 0,009      | 0,518  | 0,008      |
|          | 0,6            | 50       | 0,717                                         | 0,006      | 0,671 | 0,006      | 0,646  | 0,005      |
|          |                | 60       | 0,678                                         | 0,006      | 0,630 | 0,006      | 0,605  | 0,005      |
|          | 0,7            | 50       | 0,779                                         | 0,004      | 0,748 | 0,004      | 0,731  | 0,004      |
|          |                | 60       | 0,748                                         | 0,004      | 0,717 | 0,004      | 0,700  | 0,004      |
|          | 0,8            | 50       | 0,849                                         | 0,002      | 0,831 | 0,002      | 0,820  | 0,002      |
|          |                | 60       | 0,828                                         | 0,002      | 0,810 | 0,002      | 0,799  | 0,002      |
| 100      | 0,3            | 50       | 0,827                                         | 0,025      | 0,673 | 0,020      | 0,600  | 0,016      |
|          |                | 60       | 0,803                                         | 0,028      | 0,633 | 0,021      | 0,554  | 0,017      |
|          | 0,4            | 50       | 0,788                                         | 0,017      | 0,678 | 0,014      | 0,622  | 0,012      |
|          |                | 60       | 0,759                                         | 0,018      | 0,638 | 0,016      | 0,579  | 0,012      |
|          | 0,5            | 50       | 0,807                                         | 0,011      | 0,725 | 0,010      | 0,683  | 0,009      |
|          |                | 60       | 0,780                                         | 0,012      | 0,691 | 0,011      | 0,646  | 0,010      |
|          | 0,6            | 50       | 0,854                                         | 0,007      | 0,793 | 0,007      | 0,761  | 0,007      |
|          |                | 60       | 0,834                                         | 0,008      | 0,768 | 0,008      | 0,733  | 0,008      |
|          | 0,7            | 50       | 0,916                                         | 0,005      | 0,871 | 0,005      | 0,846  | 0,005      |
|          |                | 60       | 0,905                                         | 0,006      | 0,855 | 0,006      | 0,828  | 0,006      |
|          | 0,8            | 50       | 0,986                                         | 0,004      | 0,953 | 0,004      | 0,935  | 0,004      |
|          |                | 60       | 0,984                                         | 0,004      | 0,947 | 0,004      | 0,928  | 0,004      |
| 120      | 0,3            | 50       | 0,939                                         | 0,026      | 0,773 | 0,021      | 0,694  | 0,018      |
|          |                | 60       | 0,931                                         | 0,030      | 0,745 | 0,023      | 0,659  | 0,019      |
|          | 0,4            | 50       | 0,900                                         | 0,018      | 0,778 | 0,016      | 0,716  | 0,013      |
|          |                | 60       | 0,886                                         | 0,020      | 0,750 | 0,017      | 0,684  | 0,014      |
|          | 0,5            | 50       | 0,919                                         | 0,013      | 0,826 | 0,012      | 0,777  | 0,011      |
|          |                | 60       | 0,908                                         | 0,014      | 0,804 | 0,013      | 0,751  | 0,011      |
|          | 0,6            | 50       | 0,966                                         | 0,009      | 0,893 | 0,009      | 0,855  | 0,008      |
|          |                | 60       | 0,962                                         | 0,010      | 0,880 | 0,010      | 0,838  | 0,009      |
|          | 0,7            | 50       | 1,028                                         | 0,007      | 0,971 | 0,007      | 0,940  | 0,007      |
|          |                | 60       | 1,032                                         | 0,008      | 0,967 | 0,008      | 0,933  | 0,007      |
|          | 0,8            | 50       | 1,098                                         | 0,005      | 1,053 | 0,005      | 0,029  | 0,005      |
|          |                | 60       | 1,112                                         | 0,006      | 1,060 | 0,006      | 0,032  | 0,006      |

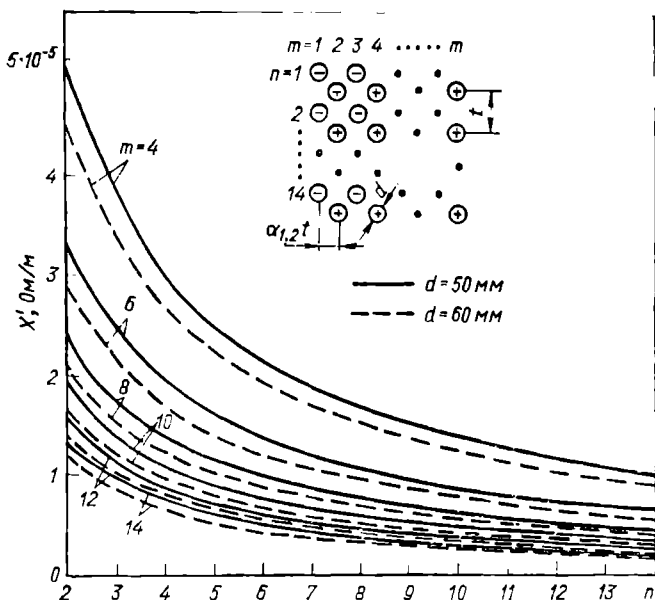


Рис. V.14.  $X' = f(n, m)$  в формуле (V.49) для трубчатого пакета с сечением по рис. V.10, e

$L \cdot \frac{c}{t}, \Gamma/\text{м}$

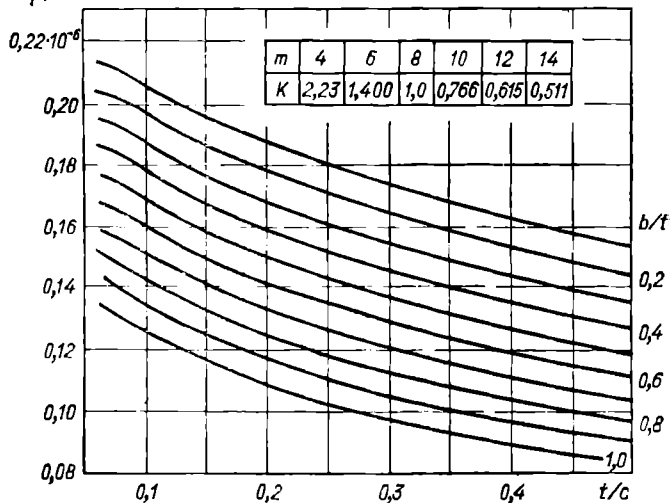


Рис. V.15. Кривая для определения индуктивности однофазного шинного пакета, сеченье которого изображено на рис. V.2



Пример 4. Найти реактивное сопротивление фазы трубчатого пакета короткой сети, изображенной на рис. I.5, а, сечение которого представлено на рис. V.10, е, при  $n=10$ ,  $m=6$ ,  $t=8,0$  см,  $\alpha_{1,2}t=6,4$  см,  $l=1000$  см,  $d=5,0$  см,  $\delta=1,0$  см.

Сопротивление фазы находится по формуле (V.50):

Из табл. 5.3  $g_{1,1}=2,1945$

Из табл. 5.7  $S_0=97,9226$

Из табл. 5.8  $S_{1,2}=103,105$  при  $\left(\alpha_{1,2} = \frac{6,4}{8,0} = 0,8\right)$ .

$S_{1,4} = 138,892$  при  $\left(\alpha_{1,4} = \frac{6,4}{8,0} \cdot 3 = 2,4\right)$ ;

$S_{1,6} = 167,138$  при  $\left(\alpha_{1,6} = \frac{6,4}{8,0} \cdot 5 = 4,0\right)$ .

Из табл. 5.9  $C_{1,3}=121,675$   $\left(\alpha_{1,3} = \frac{6,4}{8,0} \cdot 2 = 1,6\right)$ ;

$C_{1,5} = 153,477$   $\left(\alpha_{1,5} = \frac{6,4}{8,0} \cdot 4 = 3,2\right)$ .

Следовательно:

$$X = \frac{16 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1000}{6^2 \cdot 10^2} \left[ \frac{6}{2} \left( 10 \ln \frac{8}{2,1945} - 97,9226 \right) + \right. \\ \left. + 167,138 - 2 \cdot 153,477 + 3 \cdot 138,892 - 4 \cdot 121,675 + 5 \cdot 103,105 \right] = \\ = 0,0708 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Решения по нормалам. Сопротивление фазы находят по формуле (V.50). Из рис. V.14 и табл. 5.13 находим значения:  $X'=0,88 \times 10^{-5}$  Ом,  $K_2=0,825$ ,  $\Delta_2=0,002$  ( $\alpha_{1,2}=0,8$ ). Тогда по формуле (V.52)  $K_2=0,825-0,002(14-6)=0,809$ , а по формуле (V.50)

$$X = 0,88 \cdot 10^{-5} \cdot 0,809 \cdot 10 = 0,0711 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Для сечения рис. V.10, ж

$$X = \frac{32\pi \cdot 10^{-7} l}{n^2 m^2} \left[ \frac{m}{2} L'_0 - \sum_{i=1}^m (-1)^{i-1} (m-i) \Phi_{1,i+1} \right], \quad (\text{V.53})$$

где

$$L'_0 = \frac{n}{2} \ln \frac{t}{g_{1,1}} + S'_0, \quad (\text{V.54})$$

$\Phi_{1,(i+1)}$ ,  $S'_0$  — табулированные функции (табл. 5.7 и 5.14), где

$$\Phi_{1,m} = \frac{n}{2} \ln (m-1) \alpha + \sum_{i=1}^n (-1)^i (n- \\ -1) \ln \sqrt{[(m-1)\alpha]^2 + i^2}$$

ЗНАЧЕНИЯ  $\Phi_{1, i+1}^*$ 

| 1, $i+1$ | Значения $\Phi^*$ при различных $\alpha_{1,m}$ |         |         | Значения $\Phi^*$ при различных $\alpha_{1,m}$ |         |         |
|----------|------------------------------------------------|---------|---------|------------------------------------------------|---------|---------|
|          | 0,8                                            | 0,9     | 1,0     | 0,8                                            | 0,9     | 1,0     |
| $n=2$    |                                                |         |         | $n=6$                                          |         |         |
| 1,2      | 0,47049                                        | 0,40202 | 0,34657 | 1,04589                                        | 0,88651 | 0,76370 |
| 1,3      | 0,16488                                        | 0,13449 | 0,11157 | 0,41091                                        | 0,35925 | 0,32061 |
| 1,4      | 0,08004                                        | 0,06427 | 0,05268 | 0,26548                                        | 0,23522 | 0,21059 |
| 1,5      | 0,04659                                        | 0,03716 | 0,03031 | 0,19643                                        | 0,17216 | 0,15205 |
| 1,6      | 0,03031                                        | 0,02410 | 0,01961 | 0,15205                                        | 0,13131 | 0,11432 |
| $n=4$    |                                                |         |         | $n=8$                                          |         |         |
| 1,2      | 0,78658                                        | 0,67172 | 0,58157 | 1,27854                                        | 1,07503 | 0,91998 |
| 1,3      | 0,30742                                        | 0,26400 | 0,23089 | 0,49174                                        | 0,43309 | 0,39024 |
| 1,4      | 0,18326                                        | 0,15743 | 0,13689 | 0,33035                                        | 0,29772 | 0,27103 |
| 1,5      | 0,12536                                        | 0,10618 | 0,09094 | 0,25554                                        | 0,22864 | 0,20590 |
| 1,6      | 0,09094                                        | 0,07590 | 0,06415 | 0,20590                                        | 0,18187 | 0,16165 |

\*  $i+1=2, 3 \dots m$ .

$$S'_0 = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} (n-1) \ln i;$$

Пример 5. Найти реактивное сопротивление фазы трубчатого пакета короткой сети, изображенной на рис. 1.5, а, сечение которого представлено на рис. V.10, ж при  $m=2$ ,  $n=4$ ,  $l=9,0$  см,  $\alpha_{1,2}l=8,0$  см,  $l=100$  см,  $d=5,0$  см,  $\delta=1,0$  см.

Решение по формулам и таблицам.

Сопротивление фазы находится по формуле (V.53).

Из табл. 5.7  $S'_0 = -0,2877$ .

По формуле (V.54):

$$L'_0 = 2 \ln \frac{9}{2,1945} - 0,2877 = 2 \cdot 1,4112 - 0,2877 = 2,5347.$$

Из табл. 5.14 при  $m=2$ ,  $\alpha_{1,2}=0,888$ ,  $\Phi_{1,2}=0,6947$ .

Следовательно:

$$X = \frac{32 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 100}{4 \cdot 2^2} (2,5347 - 0,6947) = 157 \cdot 10^{-7} \cdot 1,84 = 0,029 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

2) шинный пакет (сечение рис. V.2, в) [8]:

$$X = \frac{16\pi \cdot 10^{-7} l}{m^2} \ln \frac{g'_{1,m} g_{1,(m-2)}^3 g_{1,(m-4)}^5 \dots g_{1,2}^{(m-1)}}{g_{1,1}^{m/2} g_{1,(m-1)}^2 g_{1,(m-3)}^4 \dots g_{1,3}^{(m-2)}}, \quad (\text{V.55})$$

где  $g_{1,i}$  — определяется из выражения (V.12), а

$g_{1,i}(i=2,3,...m)$  из табл. 5.4).

С достаточной точностью для инженерных расчетов (до 10 %) индуктивность отдельных фаз может быть определена по кривым рис. V.15, на котором индуктивность ( $L$ ), отнесенная к величине  $t/c$ , дана в зависимости от параметров  $b/t$  и  $i/c$  для  $m=8$ . На этом же рисунке приведено значение коэффициента  $K$  для расчета реактивного сопротивления пакета при  $m=4, 6, 8, ..., 14$ :

$$X = 2\pi f K i L. \quad (V.56)$$

**Пр и м е р 6.** Найти реактивное сопротивление однофазного шинного пакета короткой сети, изображенной на рис. V.2, в, при  $m=10$  (5 на полюс фазу),  $b=1,0$  см,  $c=10,0$  см,  $l=500$  см,  $t=2$  см.

а) Решение по формулам и таблицам:

По формуле (V.12):

$$g_{1,1} = 0,2236 (1 + 10) = 2,45 \text{ см}; \quad \ln 2,45 = 0,9.$$

Другие средние геометрические расстояния между первой и  $i$ -той шиной ( $g_{1,i}$ ) находим из табл. 5.4.

Результаты расчета приведены в табл. 5.15.

Сопротивление фазы находится по формуле (V.55)

$$X = \frac{16 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 500}{10^2} (2,915 + 3 \cdot 2,678 + 5 \cdot 2,373 + 7 \cdot 1,953 + 9 \cdot 1,304 - 5 \cdot 0,900 - 2 \cdot 2,803 - 4 \cdot 2,536 - 6 \cdot 2,182 - 8 \cdot 1,669) = 0,0384 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

б) Решение по нормальям.

Сопротивление фазы находится по формуле (V.56). Из рис. V.15  $L=0,03 \cdot 10^{-6}$  г/м  $= 0,03 \cdot 10^{-6}$  Г/см,  $K=0,766$ . По формуле (V.56)

$$X = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,03 \cdot 10^{-6} \cdot 0,766 \cdot 500 = 0,0361 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

Общие формулы для определения реактивного сопротивления трубчатого или шинного пакета и сопротивле-

ТАБЛИЦА 5.15

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

| Номер<br>шин | $t$ , см | $t/c$ | $g_{1,i}/c$ | $g_{1,i}$ , см | $\ln g_{1,i}$ |
|--------------|----------|-------|-------------|----------------|---------------|
| 1,10         | 18       | 1,8   | 1,844       | 18,442         | 2,915         |
| 1,8          | 14       | 1,4   | 1,455       | 14,554         | 2,678         |
| 1,6          | 10       | 1,0   | 1,073       | 10,734         | 2,373         |
| 1,4          | 6        | 0,6   | 0,705       | 7,054          | 1,953         |
| 1,2          | 2        | 0,2   | 0,369       | 3,693          | 1,304         |
| 1,9          | 16       | 1,6   | 1,649       | 16,492         | 2,803         |
| 1,7          | 12       | 1,2   | 1,263       | 12,632         | 2,536         |
| 1,5          | 8        | 0,8   | 0,887       | 8,868          | 2,182         |
| 1,3          | 4        | 0,4   | 0,531       | 5,315          | 1,669         |

ния взаимной индукции между пакетами:

а) реактивное сопротивление взаимной индукции пакета

$$X_L = 2\pi f \frac{\beta^2}{m^2} \left[ \sum_{i=1}^m L_i + \sum_{i=1}^{m-1} \alpha_i 2(m-i) M_{1,i+1} \right]; \quad (V.57)$$

б) сопротивление взаимной индукции между пакетами

$$X_M = - \frac{2\pi f}{m^2} \left[ \sum_{i=1}^m (m-i+1) M_{1,i'} + \sum_{i=1}^{m-1} i M_{m,i'} \right], \quad (V.58)$$

где  $m$  — число шин в полупакете;  $M_{1,i'}$  — взаимная индуктивность между первой шиной положительного полупакета и  $i'$ -ми шинами отрицательного полупакета;  $M_{m,i'}$  — взаимная индуктивность между  $m$ -й шиной положительного полупакета и  $i'$ -ми шинами отрицательного полупакета.

Пример 7. Определить индуктивность шинного пакета, сечение которого изображено на рис. V.2, г при  $m=4$ ,  $b=10$  мм,  $c=100$  мм,  $l=20$  мм,  $l=3$  м. По формуле (V.12)

$$g_{1,1} = 0,2236 (10 + 1) = 2,453.$$

Из табл. 5.2  $F=9,01$ , при отношении  $\frac{g_{1,1}}{l} = 0,0082$ . По формуле (V.7)  $L=300 \cdot 9,01 \cdot 10^{-9} = 2703 \cdot 10^{-9}$  Г. Значения  $M_{1,i+1}$  определяются по формуле (V.7). Результаты расчетов приведены в табл. 5.16. По формуле (V.57)

$$L = \frac{1}{16} (4 \cdot 2703 + 2 \cdot 3 \cdot 2462 + 2 \cdot 2 \cdot 2247 + 2 \cdot 1 \cdot 2080) \cdot 10^{-9} = 2421 \cdot 10^{-9} \text{ Г.}$$

Индуктивное сопротивление трубчатого пакета с одинаковым направлением токов может быть определено по формуле (V.7) и с помощью табулированных функций. В этом случае  $F$  является функцией отношения

$$\frac{g'_{1,1}}{l}, \text{ где } \ln g'_{1,1} = \frac{L_0}{n^2} \quad (V.59)$$

ТАБЛИЦА 5.16

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

| № шин | $g/c$ | $g_{1,i}$ | $g_{1,i}/l$ | $F$   | $M_{1,i} \cdot 10^{-9}$ |
|-------|-------|-----------|-------------|-------|-------------------------|
| 1,2   | 0,369 | 3,69      | 0,0123      | 8,207 | 2462                    |
| 1,3   | 0,531 | 5,31      | 0,0177      | 7,490 | 2247                    |
| 2,4   | 0,705 | 7,05      | 0,0235      | 6,934 | 2080                    |

$L_0$  — определяется по формуле (V.41) и с помощью табулированного значения  $S_0$  из табл. 5.7.

**Пример 8.** Определить индуктивность трубчатого пакета, сечение которого приведено на рис. V.10, з при  $n=5$ ,  $t=8,0$  см,  $d=500$  см,  $\delta=1,0$  см

По табл. 5.7:  $S_0=11,326$

Из табл. 5.3:  $g_{1,1}=2,19, 45.$

По формуле (V.41):

$$L_0 = 11,326 + 5 \cdot 0,786 + 20 \cdot 2,079 = 56,836.$$

По формуле (V.59)

$$\ln g'_{1,1} = \frac{56,836}{25} = 2,273; \quad g'_{1,1} = 9,71.$$

Из табл. 5.2  $F=7,31$  по отношению

$$\frac{g'_{1,1}}{l} = \frac{9,71}{500} = 0,0194.$$

По формуле (V.7)

$$L = 7,31 \cdot 500 \cdot 10^{-9} = 36 \cdot 10^{-9} \text{ Г}$$

$$X = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 3655 \cdot 10^{-9} = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

Взаимная индуктивность между вертикальными рядами трубок с одинаковым или противоположным направлением токов (однофазный пакет, рис. V.10, д, с) может быть также рассчитана по формуле (V.7) и с помощью табулированных значений. В этом случае  $F$  является функцией отношения  $g_{i,k}/l$ , где

$$\left. \begin{aligned} \ln g_{i,k} &= \ln t + \frac{C_{1,m}}{n^2} \text{ (сечение по рис. V.10, д)} \\ \ln g_{i,k} &= \ln t + \frac{S_{1,m}}{n^2} \text{ (сечение по рис. V.10, е)} \end{aligned} \right\} \quad (\text{V.60})$$

$C_{1,m}$  и  $S_{1,m}$  — табулированные функции, которые определяются из табл. 5.8, 5.9.

**Пример 9.** Определить взаимную индуктивность между вертикальными рядами трубок однофазного пакета (рис. V.10, д) при  $n=6$ ,  $m=2$ ,  $t=8,0$  см,  $a_{1,2}t=8,0$  см,  $l=300$  см.

Из табл. 5.9:  $C_{1,2}=25,7358$

По формуле (V.60):

$$\ln g_{1,2} = 2,0794 + \frac{25,7358}{36} = 2,79$$

$g_{1,2}=16,35$ . Из табл. 5.2  $F=5,316$  при отношении  $\frac{16,35}{300} = 0,0545$ .

По формуле (V.7):  $M=5,316 \cdot 300 \cdot 10^{-9}=1600 \cdot 10^{-9} \text{ Г}.$

### 3. Подвижная часть короткой сети

Подвижная часть короткой сети электродуговых печей состоит из пакета гибких лент (кабелей) и трубок электрододержателя.

#### 1. Пакеты гибких лент (кабелей)

Большую часть реактивного сопротивления коротких секций электродуговых печей составляет реактивность гирлянды гибких кабелей, особенно у дуговых сталеплавильных печей, кабельные гирлянды которых состоят из прямолинейных участков и криволинейного (рис. V.16), имеющего форму проводников, приблизительно изогнутых по дугам окружностей. Отступления от формы таких дуг, которые имеют место в процессе эксплуатации, практически не изменяют величину реактивного сопротивления. У гирлянды гибких кабелей руднотермических печей отсутствуют прямолинейные участки 1 и 2.

Индуктивность кабельной гирлянды одной фазы сталеплавильной печи  $L$  без учета влияния кабельных гирлянд других фаз трехфазной системы может быть выражена следующим образом:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 - 2M_{1,2} + 2M_{1,3} + 2M_{2,3}, \quad (V.61)$$

где  $L_1, L_2$  — собственные индуктивности прямолинейных участков 1 и 2;  $L_3$  — собственная индуктивность криволинейного участка 3;  $M_{1,2}, M_{1,3}, M_{2,3}$  — взаимные индуктивности между соответствующими участками.

Расчет собственных и взаимных индуктивностей прямолинейных участков  $L_1, L_2, M_{1,2}$  кабельных гирлянд трудностей не представляет и производится по методике, изложенной выше [формулы (V.6), (V.7)]. Трудности представляет расчет индуктивности криволинейного участка ( $L_3$ ) и взаимной индуктивности прямолинейных участков кабельных гирлянд с криволинейным  $M_{1,3}, M_{2,3}$ . Соответствующие формулы приведены также в настоящем справочнике: Величина  $L_3$  может быть рассчитана по формулам (V.29) ÷ (V.33) и с помощью таблицы 5.6 [23].

Величины  $M_{1,2}$  и  $M_{2,3}$  могут быть рассчитаны по формулам (V.7) — (V.34) и кривым рис. 5—96 [26].

Следует отметить, что значения  $M_{1,2}, M_{2,3}$  незначительны по сравнению с другими составляющими формулы (V.61) и не превышают 8 % от индуктивности кабельной гирлянды. Поэтому при инженерных расчетах, в слу-

| $D_3$ , мм | Значение $\Delta X$ , мОм, при различных $l_{тз}$ , мм |        |        |        |        |
|------------|--------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|            | 2000                                                   | 2500   | 3000   | 3500   | 4000   |
| 500        | 0,0038                                                 | 0,0048 | 0,0057 | 0,0067 | 0,0076 |
| 1000       | 0,0074                                                 | 0,0092 | 0,0111 | 0,0130 | 0,0148 |
| 1100       | 0,0080                                                 | 0,0099 | 0,0119 | 0,0139 | 0,0159 |
| 1200       | 0,0085                                                 | 0,0106 | 0,0127 | 0,0148 | 0,0169 |
| 1300       | 0,0090                                                 | 0,0112 | 0,0134 | 0,0157 | 0,0179 |
| 1400       | 0,0094                                                 | 0,0118 | 0,0141 | 0,0165 | 0,0188 |
| 1600       | 0,0103                                                 | 0,0128 | 0,0154 | 0,0180 | 0,0205 |
| 1700       | 0,0106                                                 | 0,0138 | 0,0160 | 0,0186 | 0,0213 |
| 1800       | 0,0110                                                 | 0,0138 | 0,0165 | 0,0193 | 0,0220 |
| 2500       | 0,0132                                                 | 0,0165 | 0,0198 | 0,0231 | 0,0264 |

чае необходимости можно пренебречь взаимной индуктивностью прямолинейных участков 1 и 2 с криволинейным 3 и тогда расчет упрощается.

Пример расчета реактивного сопротивления кабельных гирлянд сталеплавильной печи ДСП, мощностью 80 МВ·А приведен в п. 5 настоящей главы.

## 2. Трубки электрододержателя

Подвижная часть короткой сети включает трубки электрододержателя.

Для электрододержателя патронного типа индуктивность его трубок рис. 1.5, а, 1.7, в может быть определена по формуле (V.62) и рис. V.17

$$X_{тз} = X_c + \Delta X K_c + X_m + X_n, \quad (V.62)$$

где  $X_c$  — реактивное сопротивление, определяющееся собственной индуктивностью трубок;  $\Delta X \cdot K_c$  — «поправка на изоляцию», учитывающая расстояние между трубками (табл. 5.17);

$X_m$  — реактивное сопротивление, определяющееся взаимной индуктивностью трубок электрододержателя своей фазы с трубками соседних фаз;

$X_n$  — реактивное сопротивление, определяющееся взаимной индуктивностью трубок электрододержателя с электродами.

На рис. V.17 и в табл. 5.17 приняты следующие обозначения:  $l_{тз}$  — длина трубок (расстояние от токоподводящего кольца до середины контактных плит);  $n$  — количество трубок;  $D_3$  — диаметр электрода;  $D_p$  — диаметр распада электродов.

| Значение $K_c$ при различных $l$ |     |       |       |       |
|----------------------------------|-----|-------|-------|-------|
| 12                               | 16  | 20    | 24    | 28    |
| 1,87                             | 1,0 | 0,571 | 0,334 | 0,194 |
| 1,66                             | 1,0 | 0,656 | 0,455 | 0,331 |
| 1,64                             | 1,0 | 0,663 | 0,466 | 0,341 |
| 1,63                             | 1,0 | 0,667 | 0,474 | 0,353 |
| 1,61                             | 1,0 | 0,675 | 0,481 | 0,360 |
| 1,60                             | 1,0 | 0,680 | 0,488 | 0,367 |
| 1,58                             | 1,0 | 0,688 | 0,498 | 0,378 |
| 1,58                             | 1,0 | 0,688 | 0,502 | 0,385 |
| 1,57                             | 1,0 | 0,693 | 0,507 | 0,388 |
| 1,54                             | 1,0 | 0,706 | 0,527 | 0,412 |

Пример 11. Определить реактивное сопротивление электрододержателя патронного типа, применяемого на мощных фосфорных печах (РКЗ-48ф, РКЗ-72ф). Длина трубок электрододержателя, включая половину контактной плиты  $l_{тз}=300$  см.

Диаметр электрода ( $D_э=140$  см), число трубок электрододержателя  $n=24$ , их наружный диаметр ( $d_н=6$  см). Диаметр распада ( $D_p=450$  см). Из кривой (рис. V.17) определяются следующие параметры:

$$X_c = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}, \quad X_n = 0,078 \cdot 10^{-3} \text{ Ом},$$

$$X_m = -0,068 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

Из табл. 5.17

$$K_c = 0,488, \Delta X = 0,0141 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

По формуле (V.62):

$$X_{тз} = (0,25 + 0,488 \cdot 0,014 - 0,068 + 0,078) \cdot 10^{-3} =$$

$$= 0,267 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

Если трубки электрододержателя имеют сложную конфигурацию и расположены так, как это изображено на рис. 1.2, 1.3, 1.4, 1.13, а, б, расчет можно проводить следующим образом: весь пакет трубок электрододержателя разбивают на участки, включающие проводники, находящиеся в одной плоскости, усредняя при этом длины этих проводников. Для каждого такого участка определяется с.г.р. площади сечения проводников от самой себя и собственная индуктивность проводников этого участка. По формулам (V.20) — (V.28) определяется взаимная индуктивность между участками.

Более точные расчеты реактивного сопротивления трубок электрододержателя, имеющих сложную конфигурацию, могут быть произведены с помощью ЭВМ.



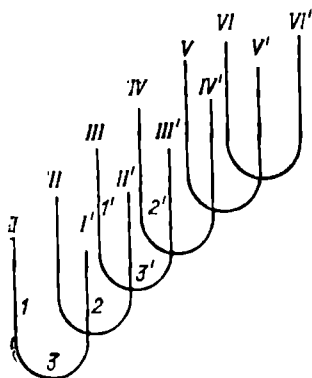


Рис. V.16. Расчетная схема кабельной гирлянды:

I, I', III, III' — первая фаза с участками 1, 2, 3 и I', 2', 3'; II, II', V, V' — вторая фаза, IV, IV', VI, VI' — третья фаза

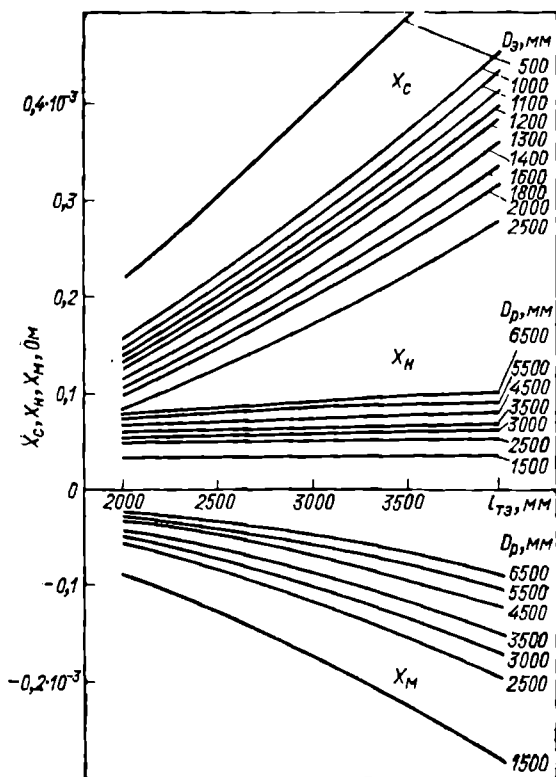


Рис. V.17.  $X_C$ ,  $X_M$ ,  $X_H \sim f(D_3, D_p, l_{T3})$  в формуле (V.62)

#### 4. Электроды и ванна электропечей

В связи с ростом единичной мощности дуговых электропечей было установлено, что реактивное сопротивление электродов и ванны в некоторых случаях превышает значение реактивного сопротивления короткой сети. Суммарное реактивное сопротивление электродов и того участка ванны, по которому ток протекает до нулевой точки подины, условно называют реактивным сопротивлением ванны. Исследования на действующих печах показали, что индуктивность ванны достигает весьма больших значений и приближается к величине, равной реактивному сопротивлению всех остальных участков печи — короткой сети и трансформатора, а иногда и превышает их. Реактивное сопротивление ванны руднотермических печей может достигать более 50 % общего реактивного сопротивления печной установки.

На основании анализа экспериментальных исследований значительного количества печей был сделан вывод, что измеренная индуктивность руднотермических печей близко совпадает с расчетой. При этом в расчетной схеме делается допущение, что пути тока в ванне от электродов совпадают с продолжением электродов до подины, а в подине сходятся в нулевой точке, симметричной относительно всех электродов в круглой ванне и относительно крайних электродов в прямоугольной ванне. Вышеуказанные пути токов от электродов до подины были подтверждены с помощью моделирования электрического поля в электролитической ванне печи с несмешивающимися электролитами [23, 27] и с помощью математического моделирования на ЭВМ [28].

Следует отметить, что вышеуказанная методика расчета реактивного сопротивления ванны дает удовлетворительные результаты для большинства руднотермических печей и приводит к заниженным значениям реактивных сопротивлений для руднотермических печей с резко выраженным дуговым режимом (например, печи для производства белого электрокорунда), что объясняется, очевидно, индуктивностью дуги.

При расчете индуктивности различных типов ванн приняты следующие обозначения:  $D_z$  — диаметр электрода;  $D_p$  — диаметр распада электродов;  $H$  — расстояние от середины контактных плит до подины;  $b$  — большая сторона сечения прямоугольного электрода;  $a$  — меньшая сторона сечения прямоугольного электрода;  $p$  —

расстояние между осевыми линиями соседних электродов.

а) Трехэлектродная круглая ванна:

$$X = 2\pi f L K_1, \quad (V.63)$$

где  $L$  — значение индуктивности при  $D_p/D_3=2,6$  приведено на рис. V.18.

Значение коэффициента  $K_1$  для других значений  $D_p/D_3$  приведено также на рис. V.18.

б) Прямоугольная трехэлектродная ванна с электродами круглого сечения, расположенными в ряд:

$$X = 2\pi f L_i K_2, \quad (V.64)$$

где  $L_i = f\left(\frac{H}{D_p}, D_p\right)$  — значение индуктивности фазы при  $D_p/D_3=2,3$  приведено на рис. V.19.

Значение коэффициента  $K_2$  для других значений  $p/D_3$  приведено на том же рисунке.

в) Прямоугольная трехэлектродная ванна с электродами прямоугольного сечения:

$$X = 2\pi f L_i K_3 K_4, \quad (V.65)$$

где  $L_i = f\left(\frac{H}{p}, a\right)$  — значение индуктивности фазы при  $p/a=3,67$  и  $b/a=4$  приведено на рис. V.20. На этом же рисунке приведены значения коэффициентов  $K_3$  и  $K_4$  для других значений  $p/a$  и  $b/a$ .

г) Круглая шестиэлектродная ванна:

$$X = 2\pi f L K_5, \quad (V.66)$$

где  $L = f\left(\frac{H}{p}, D_3\right)$  — значение индуктивности одной фазы при  $p/D_3=2,3$  приведено на рис. V.21. Значение коэффициента  $K_5$  для других  $p/D_3$  приведено на том же рисунке.

д) Прямоугольная шестиэлектродная ванна с электродами прямоугольного сечения:

$$X = 2\pi f L K_6 K_7, \quad (V.67)$$

где  $L = f\left(\frac{H}{p}, a\right)$  — значение индуктивности при  $\frac{p}{a} = 5$  и  $b/a=4,3$  приведено на рис. V.22.

Значение коэффициента  $K_6$  и  $K_7$  для других значений  $\frac{p}{a}$  и  $\frac{b}{a}$  приведено на том же рисунке.

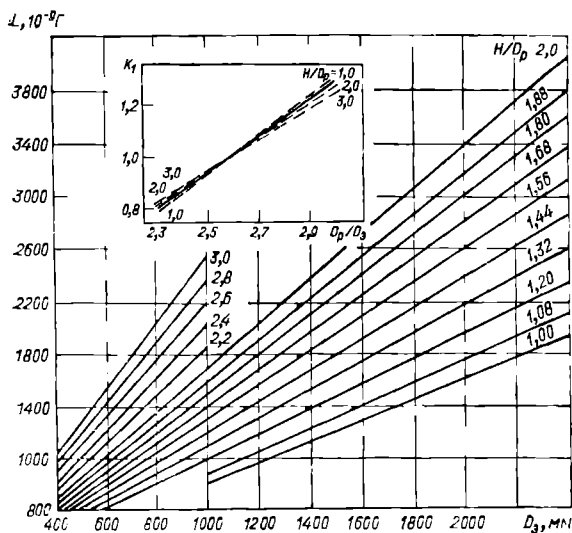


Рис. V.18. Значения  $L_i = f(H/D_p D_3)$ ,  $K_1 = f(D_p/D_3)$  в формуле (V.63)

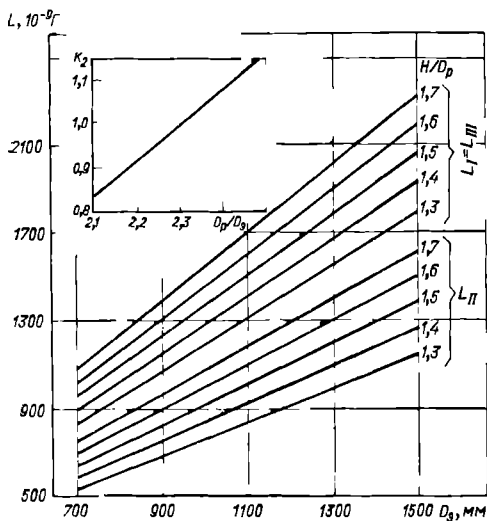


Рис. V.19. Значения  $L_i = f(H/D_p \cdot D_3)$ ,  $K_2 = f(D_p/D_3)$  в формуле (V.64)

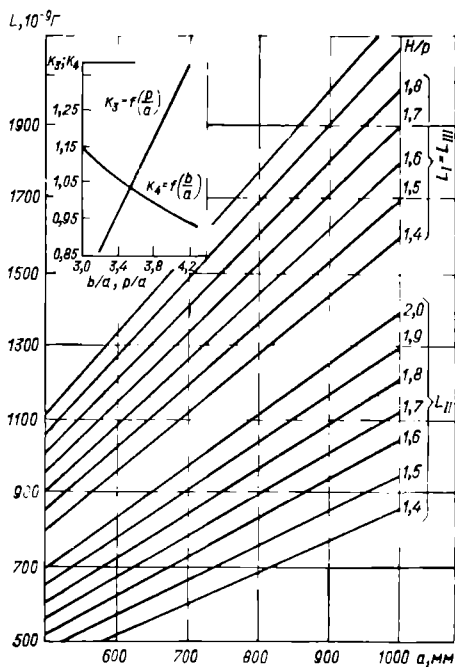


Рис. V.20. Значения  $L_1 = f(H/p, a)$ ,  $K_4 = f(b/a)$ ,  $K_3 = f(p/a)$  в формуле (V.65)

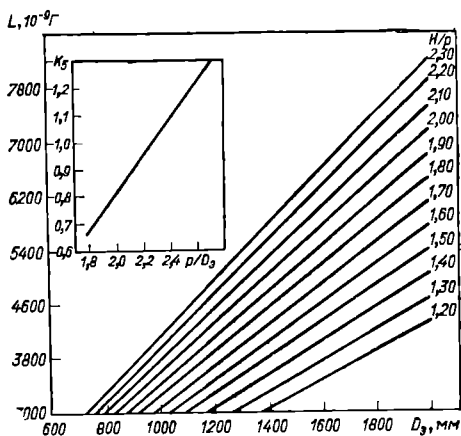


Рис. V.21. Значения  $L = f(H/p, D_g)$ ,  $K_5 = f(p/D_g)$  в формуле (V.66)

$L, 10^{-9} \Gamma$

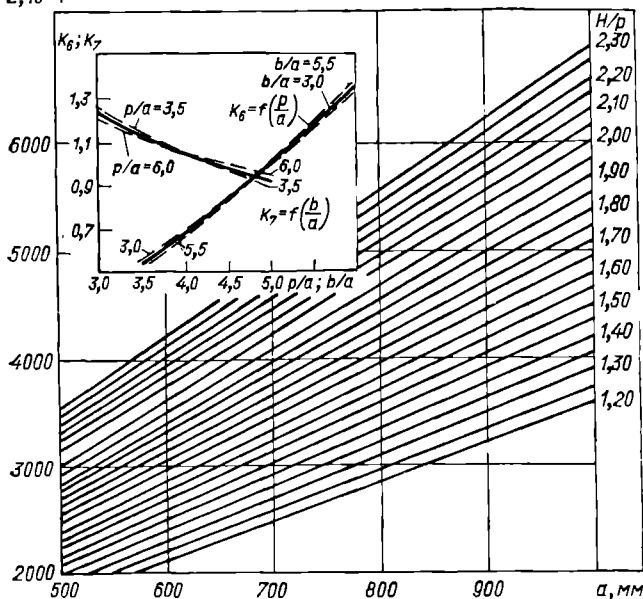


Рис. V.22. Значения  $L=f(H/p, a)$ ,  $K_6=f(p, a)$ ,  $K_7=f(b/a)$  в формуле (V 67)

Пример 12. Определить реактивное сопротивление прямоугольной трехэлектродной ванны печи с электродами прямоугольного сечения (рис. 1.9). Внутренние размеры ванны  $a=80,0$  см,  $b=320,0$  см,  $p=280,0$  см. Глубина ванны (расстояние от середины контактных плит до подны)  $H=410$  см.

Из рис. V.20  $L_I=1340 \cdot 10^{-9} \Gamma$ ,  $L_{II}=730 \cdot 10^{-9} \Gamma$ ,  $L_{III}=1340 \cdot 10^{-9} \Gamma$ ,

$$K_3=1,0, \quad K_4=0,97 \text{ при } \frac{p}{a}=3,5, \quad \frac{b}{a}=4,0 \text{ и } \frac{H}{p}=$$

$$\frac{410}{280}=1,465.$$

По формуле (V.65)

$$X_I=X_{III}=2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1340 \cdot 10^{-9} \cdot 1,0 \cdot 0,97=0,454 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

$$X_{II}=2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 730 \cdot 10^{-9} \cdot 1,0 \cdot 0,97=0,222 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

$$X_{\text{ср}}=0,346 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

## 5. Примеры расчета реактивных сопротивлений электропечей

Печь РКЗ-48ф (рис. 1.5, а; 1.13, в).

### 1) Трубчатый пакет.

Расчет реактивного сопротивления трубчатого пакета короткой сети производится отдельно для трех участков, имеющих разное сечение (рис. 1.5, а).

**Участок I (сечение А—А)** Расчет этого участка производится с достаточной степенью точности, если заменить сечение всех проводников полуфазы сечением эквивалентного проводника со сторонами  $b$  и  $c$ . В длину первого участка включается также длина компенсаторов. Реактивное сопротивление этого участка:

$$X_I = 2\pi f \cdot 2 (L_{1,1} - M_{1,2})$$

$L_{1,1}$  и  $M_{1,2}$  определяются с помощью тубализированной функции  $F$  по формуле (V.7), а  $g_{1,1}$  и  $g_{1,2}$  — по формуле (V.12) и табл. 5.4.

Для первого участка (I)  $t=28$  см;  $b=6$  см,  $c=159$  см;  $l=206,5$  см;  $g_{1,1}=36,9$  см;  $g_{1,1}/l=0,179$ ;  $F=3,17$ ;  $L_{1,1}=F \cdot 10^{-9}=665 \cdot 10^{-9}$  Г;  $g_{1,2}=55,8$  см;  $g_{1,2}/l=0,27$ ;  $F=2,51$ ;  $M_{1,2}=F \cdot 10^{-9}=518 \cdot 10^{-9}$  Г.

Следовательно:

$$X_I = 4 \cdot 3,14 \cdot 50 (655 - 518) \cdot 10^{-9} = 0,086 \text{ мОм.}$$

Расчет реактивного сопротивления участков II и III производится по формуле (V.49). Аналогичные результаты могут быть получены по нормальям (рис. V.13).

**Участок II (сечение В—В):**  $n=8$ ;  $m=2$ ;  $t=8$  см;  $a_{1,2}t=8$  см;  $l=210,8$  см;  $d=6$  см;  $\delta=1$  см. Из табл. 5.3:  $g_{1,1}=2,68$ , из табл. 5.7:  $S_0=51,11$ ;  $C_{1,2}=58,26$ .

Следовательно:

$$X_{II} = \frac{16 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 47,5}{4 \cdot 64} \left[ \frac{2}{2} \left( 8 \ln \frac{16}{2,68} - 51,11 \right) + 1 \cdot 58,26 \right] = 0,066 \text{ мОм.}$$

**Участок III (сечение С—С):**  $n=8$ ;  $m=2$ ;  $t=16$  см;  $a_{1,2}t=10$  см;  $l=47,5$  см;  $d=6$  см;  $\delta=1$  см.

Из табл. 5.3  $g_{1,1}=2,68$ , из табл. 5.7:  $S_0=51,11$ ;  $C_{1,2}=50,6$

$$X_{III} = \frac{16 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 47,5}{4 \cdot 64} \left[ \frac{2}{2} \left( 8 \ln \frac{16}{2,68} - 51,11 \right) + 1 \cdot 50,6 \right] = 0,013 \text{ мОм.}$$

Реактивное сопротивление одной фазы трубчатого пакета короткой сети, включающего три участка (I, II, III):

$$X = X_I + X_{II} + X_{III} = (0,086 + 0,066 + 0,013) = 0,165 \text{ мОм.}$$

Суммарное реактивное сопротивление фазы трубчатого пакета короткой сети, приведенное к эквивалентной звезде:

$$X_{\Delta} = \frac{0,165}{3} = 0,055 \text{ мОм.}$$

### 2) Подвижная часть короткой сети. Пакеты гибких лент.

Реактивное сопротивление фазы пакета гибких лент рассчитыва-

ется по формуле:

$$X_{г.л} = 2\pi f \cdot 2 (L_{1,1} - M_{1,11}),$$

где  $L_{1,1}$  — собственная индуктивность пакета лент с токами одного направления;  $M_{1,11}$  — взаимная индуктивность между пакетами лент с токами противоположных направлений.

Величины  $L_{1,1}$  и  $M_{1,11}$  — определяются по формуле (V.33).

В нашем случае  $l=252$  см,  $d=160$  см,  $b=30$  см,  $c=60$  см  $\varphi=180^\circ$   
 $t$  (расстояние между пакетами полуфаз) = 40 см.

По формуле (V.12)

$$g_{1,1} = 0,2236 (30 + 60) = 20,12 \text{ см.}$$

Из табл. 5.6  $F_1 = 3,344$  ( $g_{1,1}/l = 0,08$   $\varphi = 180^\circ$ )

$$\text{Тогда } L_{1,1} = F_1 \cdot l \cdot 10^{-9} = 3,344 \cdot 10^{-9} \cdot 252 = 843 \cdot 10^{-9} \text{ Г}$$

Для определения  $M_{1,11}$ :

$$\text{Из табл. 5.4 } \left( \text{при } t/c = \frac{40}{60} = 0,67 \right)$$

$$g_{1,11}/c = 0,77 \quad g_{1,11} = 45,90 \text{ см}$$

Из табл. 5.6 (при  $g_{1,11}/l = 0,18$  и  $\varphi = 180^\circ$ )

$$F_1 \approx 2,02$$

По формуле (V.33)

$$M_{1,11} = 509,54 \cdot 10^{-9} \text{ Г}$$

$$X_{г.л} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 2 (843 - 509) \cdot 10^{-9} = 0,210 \text{ мОм}$$

$$X_{\perp} = 0,07 \text{ мОм.}$$

«Башмак» (участок, соединяющий пакеты гибких лент с токоведущим кольцом) (рис. 1.5, а).

Реактивное сопротивление этого участка:

$$X_6 = 4\pi f (L_{1,1} + M_{1,2}),$$

$L_{1,1}$  — собственная индуктивность башмака, которая определяется с помощью табулированной функции  $F$  по формуле (V.7), а  $M_{1,2}$  — взаимная индуктивность между башмаками — определяется по формуле (V.2). Сечение «башмака» заменяется сечением эквивалентного проводника со сторонами  $c$  и  $b$ . В нашем случае усредненная длина башмака:  $l=82,5$  см; расстояние между башмаками  $d_r=40$  см,  $c=34$  см,  $b=28$  см.

$$g_{1,1} = 0,223 (34 + 28) = 13,86 \text{ см (формула V.12)} \quad g_{1,1}/l = 0,168,$$

$$F = 3,276 \text{ (табл. 5.2)} \quad L = 270 \cdot 10^{-9} \text{ Г — формула (V.7).}$$

$$\text{По формуле (V.2): } M_{1,2} = (82,5 + 82,5 + 40) \ln (82,5 + 82,5 + 40) + 40 \ln 40 - 2 (82,5 + 40) \ln (82,5 + 40) = \\ = 60,8 \cdot 10^{-9} \text{ Г.}$$

Реактивное сопротивление фазы этого участка

$$X = 4 \cdot 3,14 \cdot 50 (270 + 61) = 0,208 \text{ мОм}$$

$$X_{\perp} = 0,069 \text{ мОм.}$$

Трубки электрододержателя. Расчет реактивного сопротивления трубок электрододержателя  $X_{тз}$  производится по формуле (V.62).



**ЗНАЧЕНИЯ РЕАКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОДНОЙ ФАЗЫ  
ПЕЧИ РКЗ-48Ф**

| Наименование участка           | Реактивное сопротивление $X$ , мОм |                                         |
|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|
|                                | расчетные данные                   | экспериментальные данные<br>(табл. 3.6) |
| Трансформатор . . . . .        | 0,240                              | 0,240                                   |
| Трубчатый пакет . . . . .      | 0,055                              | 0,070                                   |
| Подвижная часть короткой сети: | 0,352                              | 0,340                                   |
| пакеты гибких лент . . . . .   | 0,076                              | 0,120                                   |
| башмак . . . . .               | 0,069                              |                                         |
| трубки электрододержателя      | 0,213                              | 0,220                                   |
| Ванна . . . . .                | 0,579                              | 0,550                                   |
| Итого . . . . .                | 1,226                              | 1,200                                   |

В нашем случае:  $l=257,5$  см,  $n=24$ ,  $D_0=140$  см,  $D_p=400$  см.

Из рис. V.17  $X_c=0,195$  мОм,  $X_M=-0,057$  мОм,  $X_B=0,069$  мОм.

Из табл. 5.17  $\Delta X=0,0121$  мОм,  $K_c=0,488$

$$X_{T0} \quad (0,195 + 0,0121 \cdot 0,488 - 0,057 + 0,069) = 0,213 \text{ мОм.}$$

Ванна печной установки. Расчет реактивного сопротивления ванны печной установки проводится по формуле (V.63):

$$X = 2\pi f LK_1 + K_H.$$

В нашем случае  $D_0=140$  см,  $D_p=400$  см,  $H=475$  см.

Из рис. V.18  $L=1365 \cdot 10^{-9}$  Г;  $K_1=1,19$ .

С учетом взаимной индукции трубок электрододержателя с электродами ( $X_H=0,069$  мОм, рис. V.17).

$$X = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1365 \cdot 10^{-9} \cdot 1,19 + 0,069 = 0,579 \text{ мОм.}$$

Значения реактивных сопротивлений по участкам приведены в табл. 5.18.

### Сталеплавильная печь мощностью 80 МВ·А

Треугольник на неподвижных башмаках (рис. 1.14, в)

#### 1. Копланарный вариант

Схема короткой сети — «расщепленная звезда» (рис. V.23). Трубчатый пакет (от выводов трансформатора до неподвижных башмаков) выполнен медными трубками  $\varnothing 60 \times 15$  по 8 шт. на фазу ( $n=8$ ). Расстояние между трубками  $t=210$  мм. Трубы электрододержателя расположены в одной плоскости.

Длина участков пакета и расстояния между ними приведены на рис. 23. Собственная индуктивность трубчатого пакета определяется по формуле (V.7) в следующем порядке:

Из табл. V.7  $S_0=51,1097$

Из табл. V.3

$$g_{11} = 2,55 \left( \frac{r_{BH}}{r_H} = 0,5 \quad C = \frac{g_{11}}{r_H} = 0,852 \right).$$

По формуле (V.41):

$$L_0 = 51,11 + 8 \ln 2,55 + 8 \cdot 7 \ln 21 = 229,09.$$

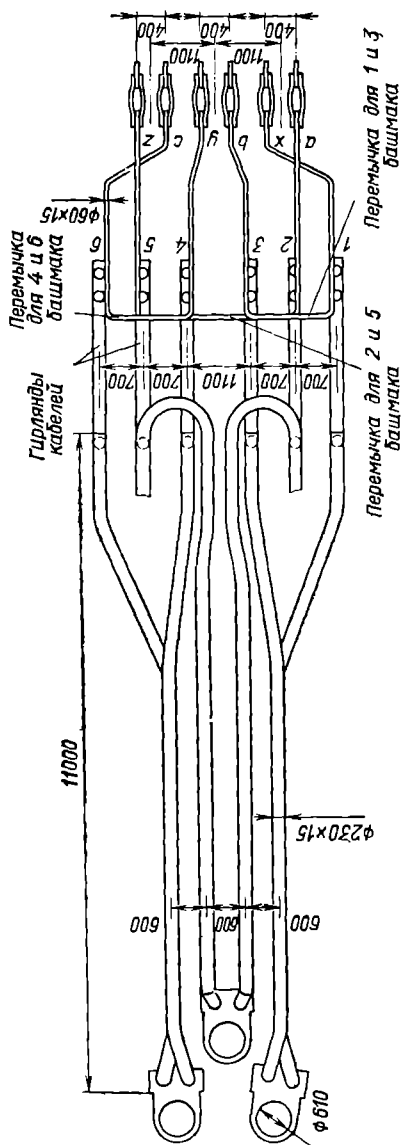


Рис. V 23. Расчетная схема короткой сети копланарного варианта ДСП мощностью 80 МВ·А

По формуле (V.59) с.г.р. всего пакета:

$$\ln g'_{1,1} = \frac{L_0}{n^2} = \frac{229,1}{64} = 3,58 \quad g'_{1,1} = 35,85 \text{ см.}$$

Из табл. 5.2 определяются значения  $F$  по отношениям  $\frac{g_{1,1}}{l}$ , где  $l$  — длина участков (рис. V.24), и затем по формуле (V.7) определяется собственная индуктивность каждого участка. Для участка длиной 160 см ( $l_{x_1} = l_{b_1} = l_{y_1} = l_{c_1} = 160$  см)  $L_{1,1} = 450 \cdot 10^{-9}$  Г. Аналогично рассчитывается индуктивность остальных участков, размеры которых приведены на рис. V.24.

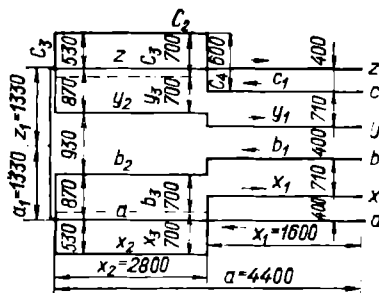


Рис. V.24. Расчетная схема трубчатого пакета (копланарный вариант)

Для расчета взаимной индукции между участками полуфаз расстояния взяты с учетом высоты трубчатого пакета (табл. 5.4). При этом высота пакета  $s = 1530$  мм, а расстояния между пакетами полуфаз приведены на рис. V.24.

Значения взаимной индуктивности между ними рассчитываются по формулам (V.16+V.22) и (V.7). Так, для участков длиной 160 см и 280 см — взаимная индуктивность  $M_{x_1, x_2} = M_{c_1, c_2} = 201 \cdot 10^{-9}$  Г.

Аналогично рассчитываются взаимные индуктивности других участков ( $M_{x_1, a} = M_{c_1, z}$ ;  $M_{x_1, b_1}$  и т. д.).

Действующая индуктивность каждой фазы трубчатого пакета, с учетом направления токов в трубках и угла между ними находится по следующим формулам:

Первая фаза

$$\begin{aligned} L_1 &= L_{x_1} + L_{x_2} + L_{x_3} + L_{x_4} + 2M_{x_1, x_2} - M_{x_1, a} - M_{x_2, a} + \\ &+ M_{x_1, a_1} - 0,5 (-M_{x_1, b_1} - M_{x_1, b_2} + M_{x_1, y_1} + M_{x_1, y_2} - \\ &- M_{x_1, c_1} - M_{x_1, c_2} + M_{x_1, z} - M_{x_2, b_1} - M_{x_2, b_2} + M_{x_2, y_1} + \\ &+ M_{x_2, y_2} - M_{x_2, c_1} - M_{x_2, c_2} + M_{x_2, z} + M_{x_3, b_1} + M_{x_3, y_1} + \\ &- M_{x_3, c_1} - M_{x_3, z_1}) = [450 + 1056 + 114 + 186 + 2 \cdot 201 - \\ &- 543 - 937 + 114 - 0,5 (-242 - 234 + 185 + 177 - \\ &- 128 - 125 + 250 - 166 - 434 + 125 + 299 - 115 - \\ &- 199 + 342 + 97 + 21 + 17 - 45)] \cdot 10^{-9} = 930 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \\ L_a &= L_a + L_{a_1} + M_{a, x_1} - M_{a, x_2} - M_{a, x_3} - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -0,5 (M_{a,b_1} + M_{a,b_2} - M_{a,y_1} - M_{a,y_2} - M_{a,z} + M_{a,c_1} + \\
& + M_{a,c_2} - M_{a_1,b_1} - M_{a_1,b_2} - M_{a_1,y_1} - M_{a_1,c_2} + M_{a_1,z_1}) = \\
& = [2013 + 336 - 543 - 937 - 114 - 0,5 (376 + 778 - \\
& - 319 - 522 - 615 + 250 + 350 - 173 - 66 - 45 + \\
& + 180)] \cdot 10^{-9} = 658 \cdot 10^{-9} \text{ Г}
\end{aligned}$$

$$L_{a,x} = (930 + 658) \cdot 10^{-9} = 1588 \cdot 10^{-9} \text{ Г}; X_{a,x} = 0,492 \text{ мОм}$$

$$X_I = 0,164 \text{ мОм}$$

Вторая фаза:

$$\begin{aligned}
L_y = L_b = L_{b_1} + L_{b_2} + L_{b_3} + 2M_{b_1,b_2} - M_{b_1,y_1} - \\
- M_{b_1,y_2} - M_{b_2,y_1} - M_{b_2,y_2} + M_{b_2,y_3} - 0,5 (M_{b_1,x_1} - \\
- M_{b_1,x_2} + M_{b_1,a} + M_{b_1,c_1} + M_{b_1,c_2} - M_{b_1,z} - M_{x_1,b_2} - \\
- M_{x_1,b_3} + M_{a,b_2} + M_{b_2,c_1} + M_{b_2,c_2} - M_{b_2,z} + M_{b_2,x_2} + \\
+ M_{b_2,c_3} - M_{b_2,a_1} - M_{b_2,z_1}) = [450 + 1056 + 114 + 2 \cdot 239 - \\
- 311 - 2 \cdot 215 - 554 + 31 - 0,5 (-242 - 166 + 376 + 185 + \\
+ 148 - 319 - 234 - 434 + 778 + 177 + 299 - 522 + 97 + 21 - \\
- 173 - 66)] \cdot 10^{-9} = 871 \cdot 10^{-9} \text{ Г}
\end{aligned}$$

$$L_{b,y} = 2 \cdot 871 \cdot 10^{-9} = 1742 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \quad X_{b,y} = 0,540 \text{ мОм}$$

$$X_{II} = 0,130 \text{ мОм} \quad X_I = X_{III} = 0,164 \text{ мОм.}$$

2. Расчет реактивного сопротивления кабельных гирлянд: Гирлянды выполнены кабелями КВС-1000, в количестве  $n=2$  на полюс-фазу. Длина  $l=13,5$  м. Расстояния между полюс-фазами приведены на рис. V.23 и в табл. 5.19.

Размеры кабеля: наружный диаметр — 7,3 см, внутренний диаметр — 4,8 см. Сечение пакета кабелей  $7,3 \times 67,3$ . Длины прямолинейных участков  $l_1=l_2=4,24$  мм, длина дуги  $l_3=5$  м;  $\varphi=180^\circ$ . Собственная индуктивность кабельной гирлянды определяется следующим образом (рис. V.16):

$$L_c = L_1 + L_2 + L_3 - 2M_{1,2} + 2M_{1,3} + 2M_{2,3},$$

где  $L_1=L_2$  — собственные индуктивности прямолинейных участков кабельных гирлянд;  $L_3$  — собственная индуктивность криволинейного участка, имеющего форму дуги ( $\varphi=180^\circ$ ,  $R=159$  см,  $l=500$  см);  $M_{1,2}=M_{2,1}$  — взаимная индукция между прямолинейными участками гирлянды кабелей, расстояние между которыми  $2R=318$  см.

$M_{1,3}=M_{2,3}$  — взаимная индуктивность между прямолинейным и криволинейным участками кабельной гирлянды.

По формуле (V.12) определяется с. г. р. гирлянды от самой себя:

$$g_{1,1} = 0,2236 (7,3 + 67,3) = 16,68 \text{ см.}$$

По формуле (V.7) и табл. 5.2

$$L_1 = L_2 = 2525 \cdot 10^{-9} \text{ Г}; \quad M_{1,2} = 510 \cdot 10^{-9} \text{ Г}$$

По формулам (V.30) — (V.32) и рис. (V.7)

$$L_3 = 2417 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \quad (H = g_{1,1} \text{ в ф. ле (V.30)).}$$

ТАБЛИЦА 5.19

ЗНАЧЕНИЯ ВЗАИМОИНДУКЦИИ МЕЖДУ ДУГАМИ ПОЛУФАЗ  
КАБЕЛЬНЫХ ГИРЛЯНД (РИС. V.16, V.23)

| № п/п | $g_{i,i}$               | $g_{i,i}/l$              | $F_i$ | $M_{\Sigma} \cdot 10^{-9} \Gamma$ |
|-------|-------------------------|--------------------------|-------|-----------------------------------|
| 1     | $g_{I, II}$             | $\frac{70}{500} = 0,14$  | 2,396 | $M_{I, II} = 1198$                |
| 2     | $g_{III, IV}$           | $\frac{110}{500} = 0,22$ | 1,733 | $M_{III, IV} = 866$               |
| 3     | $g_{I, III}$            | $\frac{140}{500} = 0,28$ | 1,415 | $M_{I, III} = 707$                |
| 4     | $g_{II, IV}$            | $\frac{180}{500} = 0,36$ | 1,132 | $M_{II, IV} = 566$                |
| 5     | $g_{II, V} = g_{I, IV}$ | $\frac{250}{500} = 0,5$  | 0,829 | $M_{II, V} = 415 = M_{I, IV}$     |
| 6     | $g_{II, VI} = g_{I, V}$ | $\frac{320}{500} = 0,64$ | 0,640 | $M_{II, VI} = 320 = M_{I, V}$     |
| 7     | $g_{I, VI}$             | $\frac{390}{500} = 0,78$ | 0,536 | $M_{I, VI} = 268$                 |

Из рис. (5-9)  $M_{1,3} = M_{2,3} = 175 \cdot 10^{-9} \Gamma$

$$L_C = (2525 \cdot 2 + 2417 - 2 \cdot 510 + 4 \cdot 175) \cdot 10^{-9} = 7147.$$

Взаимная индуктивность между дугами гирлянд своей и соседних полуфаз определяются по формулам (V.29), (V.33) и табл. 5.6

по отношению  $\frac{g_{t,i}}{l}$  к углу, соответствующему дуге  $\varphi = 180^\circ$ .

Данные расчета и расстояния ( $g_{t,i}$ ) между полуфазам гирлянд приведены в табл. 5.19.

Взаимные индуктивности между прямолинейными участками кабельных гирлянд рассчитываются по формуле (V.7) и табл. 5.2. Данные расчета сведены в табл. 5.20.

Индуктивность фаз кабельных гирлянд:

$$\begin{aligned}
 L_I = L_{III} = \frac{1}{4} & \left[ 2L_C + 2M_{I,III} + 4M_{I,III} - 4M_{I,III}' - \right. \\
 & - 0,5 (2M_{I,II} + M_{I,II} + M_{I,V} + M_{I,VI} + 2M_{I,II} + \\
 & + 2M_{I,IV} + 2M_{I,V} + 2M_{I,IV} - 2M_{I,II}' + 2M_{I,IV}' - 2M_{I,V}' - \\
 & - 2M_{I,VI}' + M_{III,II} + M_{III,IV} + M_{III,V} + M_{III,VI} + \\
 & + 2M_{III,II} + 2M_{III,IV} + 2M_{III,V} + 2M_{III,VI} -
 \end{aligned}$$

ТАБЛИЦА 5.20

ЗНАЧЕНИЯ ВЗАМОИНДУКЦИИ МЕЖДУ ПРЯМОЛИНЕЙНЫМИ  
УЧАСТКАМИ ПОЛУФАЗ КАБЕЛЬНЫХ ГИРЛЯНД. РАСЧЕТНАЯ СХЕМА  
КОТОРЫХ ИЗОБРАЖЕНА НА РИС. V.16

| $g_{i, i}/l$ | $M \cdot 10^{-9} \Gamma$   | $g_{i, i}/l$ | $M \cdot 10^{-9} \Gamma$ |
|--------------|----------------------------|--------------|--------------------------|
| 0,165        | $M_{I, II}=1405$           | 0,917        | $M_{I, VI}=428$          |
| 0,259        | $M_{III, IV}=1093$         | 0,773        | $M_{I, II'}=496$         |
| 0,330        | $M_{I, III}=941$           | 0,821        | $M_{I, III'}=471$        |
| 0,424        | $M_{II, IV}=793$           | 0,957        | $M_{I, IV'}=413$         |
| 0,588        | $M_{I, IV}, M_{II, V}=520$ | 1,065        | $M_{I, V'}=377$          |
| 0,444        | $M_{II, VI}, M_{I, V}=507$ | 1,190        | $M_{I, VI'}=340$         |
| 0,795        | $M_{III, IV'}=485$         | 0,864        | $M_{II, IV'}=451$        |

$$\begin{aligned}
 & -2M_{III, II'} - 2M_{III, IV'} - 2M_{III, V'} - 2M_{III, VI'} \Big) = \\
 & = \frac{1}{4} [7147 \cdot 2 + 2 \cdot 707 + 4 \cdot 941 - 4 \cdot 471 - 0,5 (2 \cdot 1198 + \\
 & + 415 + 320 + 268 + 4 \cdot 1405 + 2 \cdot 520 + 2 \cdot 507 + 2 \cdot 428 - \\
 & - 4 \cdot 496 - 2 \cdot 413 - 2 \cdot 377 - 2 \cdot 340 + 866 + 566 + 415 + \\
 & + 2 \cdot 1093 + 2 \cdot 793 + 2 \cdot 520 - 2 \cdot 485 - 2 \cdot 451 - 2 \cdot 413)] = \\
 & = 2941,25 \cdot 10^{-9} \Gamma \quad X = 0,923 \text{ мОм}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L_{II} &= \frac{1}{4} [2L_C + 2M_{II, V} + 4M_{II, V} - 4M_{II, V'} - \\
 & - 0,5 (4M_{I, II} + 8M_{I, II} - 8M_{I, II'} + 2M_{II, IV} + 4M_{II, IV} - \\
 & - 4M_{II, IV'} + 2M_{II, VI} + 4M_{II, VI} - 4M_{II, VI'} = \\
 & = \frac{1}{4} [2 \cdot 7147 + 2 \cdot 415 + 4 \cdot 520 - 4 \cdot 413 - 0,5 (2 \cdot 1198 + 2 \cdot 1198 + \\
 & + 2 \cdot 566 + 2 \cdot 320 + 4 \cdot 1405 + 4 \cdot 1405 + 4 \cdot 793 + 4 \cdot 507 - 4 \cdot 496 - \\
 & - 4 \cdot 496 - 4 \cdot 451 - 4 \cdot 377)] = 1922,5 \cdot 10^{-9} \Gamma
 \end{aligned}$$

$X = 0,603 \text{ мОм}$  (рис. V.16; V.23),

где  $M_{\subseteq}$  — взаимоиנדукция между дугами полуфаз;  $M_{=}$  — взаимоиנדукция между прямолинейными участками полуфаз.

3. Трубки электрододержателя выполнены в количестве  $n=2$  на полюс-фазу, диаметром  $\varnothing 230/15$ .

Расстояния между ними и длины участков приведены на рис. V.25. Из табл. 5.3  $g_{II} = C \cdot r_n = 0,957 \cdot 11,5 = 11 \text{ см}$ . Собственная индуктивность трубок (по участкам) рассчитывается по формуле (V.12). Так, для участка длиной  $l=8600 \text{ мм}$   $L=6990 \cdot 10^{-9} \Gamma$ .

Аналогично рассчитывается индуктивность других участков. Взаимная индуктивность между трубками электрододержателя, расположенных горизонтально, рассчитывается по формулам (V.12), (V.18),

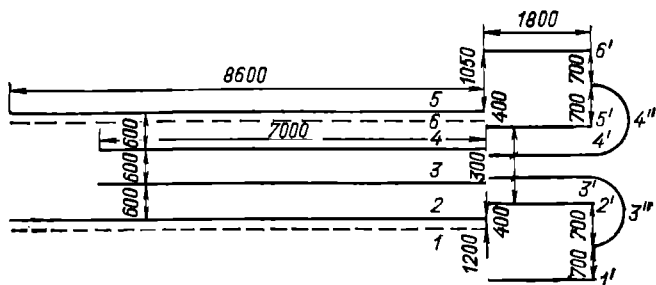


Рис. V.25. Расчетная схема трубок электрододержателя (копланарный вариант)

(V.19). Так, между участками длиной  $l_1 = l_2 = 8600$  мм, а расстоянием  $g_{1,2} = g_{5,6} = 1200$  мм  $M_{5,6} = M_{1,2} = 3086 \cdot 10^{-9}$  Г. Взаимная индуктивность между участками длиной  $l = 8600$  мм и  $l = 7000$  мм  $M_{1,3} = 2447 \cdot 10^{-9}$  Г. Аналогично рассчитываются взаимные индуктивности и между другими участками, размеры которых приведены на рис. V.25.

Действующая индуктивность фаз трубок электрододержателя, расположенных горизонтально (рис. V.26):

$$L_I = L_{III} = \frac{1}{4} [L_1 + L_1' + 2M_{1,1'} + L_2 + L_2' + 2M_{2,2'} + 2M_{1,2} + 2M_{1,2'} + 2M_{1,2'} + 2M_{2,1'} - 0,5 (M_{1,3'} + M_{1,3''} + M_{1,3} + M_{1,4} + M_{1,4'} + M_{1,4''} + M_{1,5} + M_{1,5'} + M_{1,6} + M_{1,6'} + M_{1,6''} + M_{1,3'} + M_{1,3''} + M_{1,3'} + M_{1,3''} + M_{1,4} + M_{1,4'} + M_{1,4''} + M_{1,5'} + M_{1,5''} + M_{1,6} + M_{1,6'} + M_{1,6''} + M_{2,3} + M_{2,3'} + M_{2,3''} + M_{2,4} + M_{2,4'} + M_{2,4''} + M_{2,5} + M_{2,5'} + M_{2,5''} + M_{2,6} + M_{2,6'} + M_{2,6''} + M_{2,3'} + M_{2,3''} + M_{2,3'} + M_{2,3''} + M_{2,4'} + M_{2,4''} + M_{2,4'} + M_{2,4''} + M_{2,5'} + M_{2,5''} + M_{2,6} + M_{2,6'} + M_{2,6''}] = 2933 \cdot 10^{-9} \text{ Г}$$

$$L_{II} = \frac{1}{4} 2 [L_3 + L_3' + L_3'' + 2M_{3,3'} + 2M_{3,3''} + 2M_{3,3'} + M_{3,4} + M_{3,4'} + M_{3,4''} + M_{3,4'} + M_{3,4'} + M_{3,4''} + M_{3,4'} + M_{3,4''} - 0,5 (M_{3,1} + M_{3,1'} + M_{3,1''} + M_{3,1'} + M_{3,1'} + M_{3,1''} + M_{3,2} + M_{3,2'} + M_{3,2''} + M_{3,2'} + M_{3,2'} + M_{3,2''} + M_{3,2'} + M_{3,2''} + M_{3,5} + M_{3,5'} + M_{3,5''} + M_{3,5'} + M_{3,5'} + M_{3,5''} + M_{3,6} + M_{3,6'} + M_{3,6''} + M_{3,6'} + M_{3,6'} + M_{3,6''} + M_{3,6'} + M_{3,6''}] = 2893 \cdot 10^{-9} \text{ Г}.$$

Действующая индуктивность отдельных фаз вертикального участка трубок электрододержателя  $n=2$  (на фазу) и длиной  $l=1800$  мм рассчитывается по формулам:

$$L_I = L_{III} = \frac{1}{4} [L_1 + L_2 + 2M_{1,2} - 0,5 (M_{1,3} + M_{1,4} + M_{1,5} +$$





## РЕАКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОРОТКОЙ СЕТИ КОПЛАНАРНОГО ВАРИАНТА

| Наименование участков               | I фаза<br>$X, \text{ мОм}$ | II фаза<br>$X, \text{ мОм}$ | III фаза<br>$X, \text{ мОм}$ | $X_{\text{ср}}, \text{ мОм}$ |
|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Трубчатый пакет . . . . .           | 0,164                      | 0,180                       | 0,164                        | 0,169                        |
| Пакет кабельных гирлянд . . . . .   | 0,923                      | 0,603                       | 0,923                        | 0,816                        |
| Трубки электрододержателя . . . . . | 1,075                      | 1,062                       | 1,075                        | 1,071                        |
| Вся короткая сеть . . . . .         | 2,162                      | 1,845                       | 2,162                        | 2,056                        |

$$+ M_{1,6} + M_{2,3} + M_{2,4} + M_{2,5} + M_{2,6}] = 490 \cdot 10^{-9} \text{ Г}$$

$$L_{II} = \frac{1}{4} 2 [L_3 + M_{3,4} - 0,5 (M_{3,1} + M_{3,2} + M_{3,4})] = 490 \cdot 10^{-9} \text{ Г},$$

где значения ( $L_1, L_2, L_3$ ) и ( $M_{1,2}; M_{1,3}$  и т. д.) рассчитываются аналогично индуктивности горизонтального участка трубок электрододержателя.

Общая индуктивность трубок электрододержателя:

$$L_I = L_{III} = (2933 + 490) \cdot 10^{-9} = 3423 \cdot 10^{-9} \text{ Г}$$

$$X_I = X_{III} = 1,075 \text{ мОм}$$

$$L_{II} = (2893 + 490) \cdot 10^{-9} = 3383 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \quad X_{II} = 1,062 \text{ мОм}$$

Реактивное сопротивление короткой сети установки приведены в табл. 5.21.

## II. Триангулированный вариант

Эскиз расчетной схемы короткой сети ДСП представлен на рис. V.29.

1) Трубчатый пакет выполнен из медных трубок диаметром  $60 \times 15$  по 8 шт. на полуфазу. На рис. V.27 представлена расчетная схема и размеры отдельных участков полуфаз пакета. Расчет собственных и взаимных индуктивностей отдельных участков пакета производится по формулам (V.7), (V.16), (V.22), (V.41) и табл. 5.7 и 5.3, аналогично методике, приведенной при расчете трубчатого пакета копланарного варианта. В результате проведенного расчета реактивное сопротивление фаз (приведенное к звезде):  $X_I = 0,12 \text{ мОм}$ ,  $X_{II} = 0,27 \text{ мОм}$ ,  $X_{III} = 0,12 \text{ мОм}$ .

2) Кабельные гирлянды выполнены кабелями КВС-1000, в количестве 8 шт. на полуфазу. Расчетная длина  $l = 14 \text{ м}$ . Расчетный эскиз участка гибких кабелей триангулированного варианта представлен на рис. V.28. Пакет кабельных гирлянд, как и в предыдущем расчете, делится на прямоугольные участки и криволинейные участки, имеющие форму дуги, изогнутую под углом  $180^\circ$ .

Расчетное сечение пакета кабелей  $65,5 \times 85,5$ . Длины прямолинейных участков  $l = 3,5 \text{ м}$  и  $5,43 \text{ м}$ . Длины дуг  $l = 7 \text{ м}$  и  $l = 3,14 \text{ м}$  (рис. V.28).

По формуле (V.12) определяется с.г.р. всех участков гирлянды от самой себя.

*Прямолинейные участки*

Собственные индуктивности прямолинейных участков:

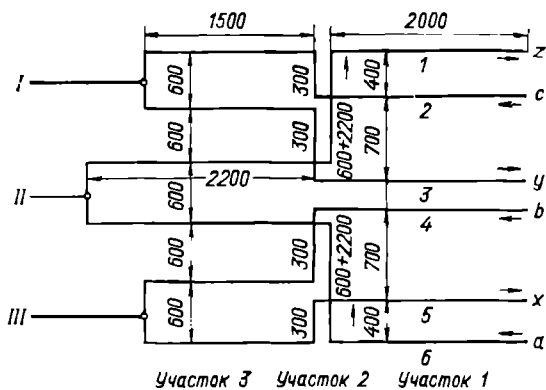


Рис. V.27. Расчетная схема шинного пакета (трнгулированный вариант)

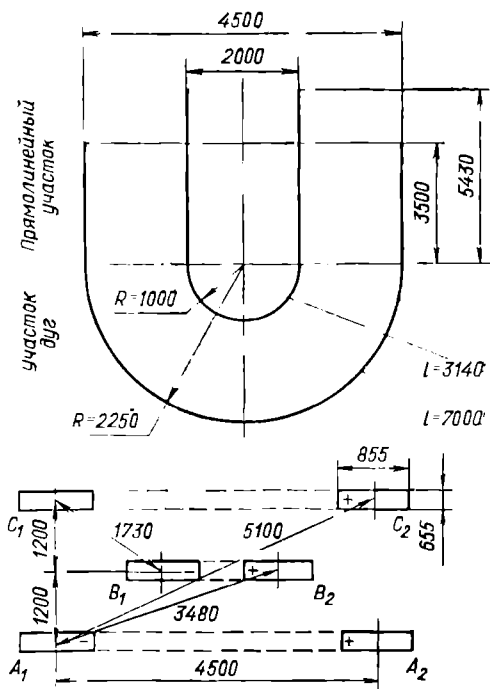


Рис. V.28. Расчетная схема участка гибких кабелей (трнгулированный вариант)

$$l = 3,5 \text{ м} \left( \frac{g}{l} = \frac{33,6}{350} = 0,096 \quad F = 4,26 \quad L_c = 1491 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \right)$$

$$l = 5,43 \text{ м} \left( \frac{g}{l} = \frac{33,6}{543} = 0,062 \quad F = 5,07 \quad L_c = 2753 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \right).$$

Взаимные индуктивности между прямолинейными участками кабельной гирлянды (рис. V.28).

$$M_{A,C_1} = 452 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{240}{350} = 0,685 \quad F = 1,29 \right)$$

$$M_{A,B_1} = 0,5 (M_{l=3,5} + M_{l=5,43} - M_{l=1,93}) = 0,5 (583 + 1227 - 198) = 806 \cdot 10^{-9} \text{ Г}$$

$$M_{l=3,5} = 583 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{173}{350} = 0,494 \quad F = 1,666 \right)$$

$$M_{l=5,43} = 1227 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{173}{543} = 0,319 \quad F = 2,26 \right)$$

$$M_{l=1,93} = 198 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{173}{193} = 0,896 \quad F = 1,03 \right)$$

$$M_{A,B_2} = 0,5 (M_{l=3,5} + M_{l=5,43} - M_{l=1,93}) = 0,5 (329 + 738 - 104) = 481 \cdot 10^{-9} \text{ Г}$$

$$M_{l=3,5} = 329 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{348}{350} = 0,995 \quad F = 0,94 \right)$$

$$M_{l=5,43} = 738 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{348}{543} = 0,64 \quad F = 1,36 \right)$$

$$M_{l=1,93} = 104 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{348}{193} = 1,8 \quad F = 0,54 \right)$$

$$M_{A,A_1} = 262 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{450}{350} = 1,28 \quad F = 0,747 \right)$$

$$M_{A,C_2} = 232 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{510}{350} = 1,38 \quad F = 0,661 \right)$$

$$M_{B_1,B_2} = 1116 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{200}{543} = 0,368 \quad F = 2,055 \right).$$

Собственная и взаимная индуктивность дуг между кабельными гирляндами своей и соседних фаз определяется по формулам (V.29), (V.33) и табл. 5.6.

$$l = 7,0 \text{ м} \quad L_c = 3030 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{33,6}{700} = 0,048 \quad F = 4,33 \right)$$

$$l = 3,14 \text{ м} \quad L_c = 895 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{33,6}{314} = 0,107 \quad F = 2,85 \right)$$

$$M_{AC} = 840 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{240}{700} = 0,343 \quad F = 1,2 \right)$$

$$M_{AB} = 610 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{173}{507} = 0,342 \quad F_1 = 1,2 \right).$$

Взаимная индуктивность между прямолинейными участками и дугами определяется на рис. V.9, 6

$$M = 0,22 \text{ МкГ} = 220 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \quad (R = 225 \text{ см}, \quad l = 350 \text{ см})$$

$$M = 0,113 \text{ МкГ} = 113 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \quad (R = 100 \text{ см}, \quad l = 543 \text{ см}).$$

Действующая индуктивность прямолинейного участка

$$L_{A_1} = L_{C_1} = L_{A_2} = L_{C_2} = L_{\text{сое}} + 0,5 (-M_{A_1 C_1} - M_{A_1 B_1} + M_{A_1 B_2} + M_{A_1 C_2}) - M_{A_1 A_2} = 1491 + 0,5 (-452 - 806 + 481 + 232) - 262 = 956 \cdot 10^{-9} \text{ Г}.$$

$$L_{B_1} = L_{B_2} = L_c + 0,5 (-M_{A_1 B_1} - M_{C_1 B_1} + M_{B_1 C_2} + M_{B_1 A_2}) - M_{B_1 B_2} = 2753 + 0,5 (-806 - 806 + 481 + 481) - 1110 = 1318 \cdot 10^{-9} \text{ Г}.$$

Действующая индуктивность участка дуг

$$L_A = L_c = L_{\text{сое}} - 0,5 (M_{AC} + M_{AB}) = 3030 - 0,5 (840 + 610) = 2305 \cdot 10^{-9} \text{ Г}$$

$$L_B = L_{\text{сое}} - 0,5 (M_{AB} + M_{AB}) = 895 - 0,5 (610 + 610) = 285 \cdot 10^{-9} \text{ Г}$$

Действующая индуктивность кабельной гирлянды

$$L_A = L_c = 956 + 2305 + 956 + 4 \cdot 220 = 5097$$

$$L_B = 1318 + 285 + 1318 + 4 \cdot 113 = 3373.$$

Реактивное сопротивление фаз кабельной гирлянды:  $X_A = X_C = 1,6 \text{ мОм}$   $X_B = 1,06 \text{ мОм}$ .

3) Трубки электрододержателя медные диаметром 230/200 мм.

Расчетный эскиз участка труб со всеми необходимыми для расчета размерами представлен на рис. V.29.

Расчет собственных и взаимных индуктивностей трех участков, на которые разбивали условно трубки электрододержателя, производится по формулам: (V.7), (V.11) и табл. 5.2.

Участок I. Собственные индуктивности:  $g_{11} = \frac{11,5 + 10,0}{2} = 10,75 \text{ см}$ . По формуле (V.7):

$$L_{A_1} = L_{C_1} = 650 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{10,75}{140} = 0,077 \quad F = 4,66 \right)$$

$$L_{C_1} = L_{A_2} = 1363 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{10,75}{240} = 0,045 \quad F = 5,68 \right)$$

$$L_{B_1} = L_{B_2} = 2079 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{10,75}{330} = 0,0326 \quad F = 6,3 \right)$$

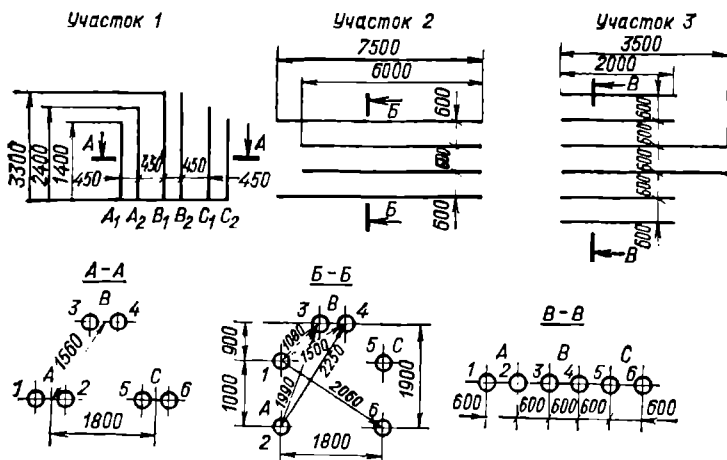


Рис. V.29. Расчетная схема трубок электрододержателя (триангулированный вариант)

Взаимные индуктивности полуфаз [формула (V.7)]:

$$M_{C_1C_2} = M_{A_1A_2} = 0,5 (M_{l=1,4} + M_{l=2,42} - M_{l=1,0}) = 0,5 (315 + 742 - 178) = 440 \cdot 10^{-9} \text{ Г}$$

$$M_{l=1,4} = 315 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{45}{140} = 0,321 \quad F = 2,25 \right)$$

$$M_{l=2,4} = 742 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{45}{240} = 0,188 \quad F = 3,09 \right)$$

$$M_{l=1,0} = 178 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{45}{100} = 0,45 \quad F = 1,78 \right)$$

$$M_{B_1B_2} = 1200 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{45}{330} = 0,136 \quad F = 3,64 \right)$$

$$L_{A_{\text{собр}}} = L_{C_{\text{собр}}} = \frac{L_{A_1} + M_{A_1A_2} + L_{A_2} + M_{A_1A_2}}{4} =$$

$$= \frac{650 + 440 + 1363 + 440}{4} = 723 \cdot 10^{-9} \text{ Г}$$

$$L_{B_{\text{собр}}} = \frac{L_{B_1} + L_{B_2} + 2M_{B_1B_2}}{4} = \frac{2(2079 + 1200)}{4} = 1640 \cdot 10^{-9} \text{ Г}$$

Взаимные индуктивности между фазами:

$$M = 440 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g}{l} = \frac{156}{285} = 0,547 \quad F = 1,54 \right).$$

Действующая индуктивность участка I:

$$L_A = L_C = 723 - 0,5 (440 + 440) = 283 \cdot 10^{-9} \text{ Г}$$

$$L_B = 1640 - 0,5 (440 + 440) = 1200 \cdot 10^{-9} \text{ Г.}$$

Аналогично производится расчет участков II и III. Действующая индуктивность фаз участка II:

$$L_A = 2430 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \quad L_B = 1750 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \quad L_C = 2430 \cdot 10^{-9} \text{ Г.}$$

Действующая индуктивность участка III:

$$L_A = L_C = 750 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \quad L_B = 1640 \cdot 10^{-9} \text{ Г.}$$

Действующая индуктивность трубок электрододержателя:

$$L_I = L_{III} = 283 + 2430 + 750 = 3413 \cdot 10^{-9} \text{ Г}$$

$$L_{II} = 1200 + 1750 + 1640 = 4590 \cdot 10^{-9} \text{ Г.}$$

Индуктивное сопротивление трубок электрододержателя:

$$X_I = X_{III} = 1,1 \text{ мОм} \quad X_{II} = 1,44 \text{ мОм.}$$

4) Индуктивное сопротивление электродов и ванны копланарного и триангулированного вариантов [формула (V.63)]. Диаметр электрода 610 мм, длина  $l=7,5$  м.

Расстояние между электродами 1,56 м (диаметр распада=1,8 м).

$$L_{\text{соб. (электрода)}} = 4770 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \quad (g_{II} = 0,778 \cdot 3,05 = 23,7 \text{ см})$$

$$\frac{g_{II}}{l} = \frac{23,7}{750} = 0,0316 \quad F = 6,36$$

$$M_{II,III} = M_{I,III} = 2190 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g_{13}}{l} = \frac{156}{750} = 0,208 \quad F = 2,92 \right)$$

$$L_g = L_C - 0,5 (M_{I,II} + M_{I,III}) = 4770 - 0,5 (2190 + 2190) = 2580 \cdot 10^{-9} \text{ Г.}$$

По формуле (V.7) и табл. 5.2

$$L_{\text{соб. (подины)}} = 228 \cdot 10^{-9} \text{ Г} \left( \frac{g_{II}}{l} = \frac{23,7}{90} = 0,264 \quad F = 2,54 \right);$$

$$M_{I,II} = M_{I,III} = lF = 90 (-0,767) \cdot 10^{-9} = 69 \cdot 10^{-9} \text{ Г}$$

$$(b/a = 1; \quad \varphi = 120^\circ; \quad \cos \varphi = 0,5; \quad F = 0,767)$$

$$L_d = L_{\text{соб}} - 0,5 (M_{I,II} + M_{I,III}) = 228 + 69 = 297 \cdot 10^{-9} \text{ Г.}$$

Реактивное сопротивление электродов и ванны:

$$X = X_{\text{эл}} + X_{\text{под}} = 2,3,14 \cdot 50 (2580 + 297) \cdot 10^{-9} = 0,903 \text{ мОм.}$$

В табл. 5.22 приводятся результаты расчета копланарного и триангулированного вариантов ДСП мощностью 80 МВ·А.

В работе [33] приведены экспериментальные данные для печи ДСП-100 с трансформатором 80 МВ·А ЭТЦНД 160000/35, из которых следует, что реактивное сопротивление печи  $X=3,71$  мОм. Это практически совпадает с расчетными данными, приведенными в табл. 5.22.

ДАННЫЕ РАСЧЕТА РЕАКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДВУХ ВАРИАНТОВ  
ДСП МОЩНОСТЬЮ 80 МВ·А

| Наименование участка                | Копланарный вариант       | Триангулированный вариант |
|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                                     | $X_{\text{ср}}$ фазы, мОм | $X_{\text{ср}}$ фазы, мОм |
| Трансформатор . . . . .             | 0,36                      | 0,36                      |
| Трубчатый пакет . . . . .           | 0,17                      | 0,17                      |
| Гибкие кабели . . . . .             | 0,82                      | 1,42                      |
| Трубки электрододержателя . . . . . | 1,07                      | 1,20                      |
| Ванна и электроды . . . . .         | 0,90                      | 0,90                      |
| Итого . . . . .                     | 3,32                      | 4,05                      |

Подробные расчеты реактивного сопротивления руднотермических печей и ДСП приведены для наглядности использования аналитического метода расчета, изложенного в настоящей главе. В последнее время для ускорения расчетов используются ЭВМ.

## 6. Применение ЭВМ при расчете реактивных сопротивлений коротких сетей

Как указывалось выше, при рассмотрении значительного числа вариантов вторичных токопроводов требуется большая затрата труда и времени. Применение ЭВМ значительно уменьшает эти затраты. Также как и при расчетах с помощью аналитических выражений, таблиц и нормалей, в случае применения ЭВМ короткая сеть (вторичный токопровод) разбивается на отдельные участки: шинный пакет, гибкие кабели, трубины электрододержателя, электроды и ванна. В качестве примера рассмотрим расчет реактивного сопротивления шинного и трубчатого пакетов, а также гибких кабелей.

Исходными данными для расчета шинного пакета являются геометрические размеры: сечение проводников, их длина, расстояние между проводниками и расстояние между пакетами шин. Для расчета реактивного сопротивления нешихтованного однофазного пакета, представленного на рис. V.30, 6 справедлива следующая формула:

$$X = 2 (X_L - X_M),$$

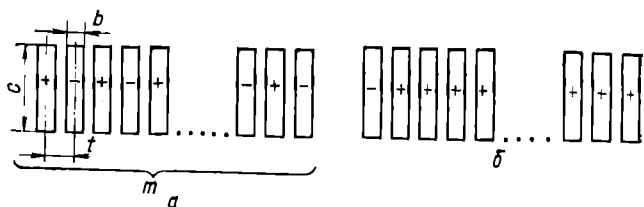


Рис. V.30. Расположение шин в шинном пакете:  
 а — шихтованный пакет; б — нешихтованный полупакет

где  $X_L$  — реактивное сопротивление полупакета

$$X_L = 2\pi f \frac{1}{(m/\beta)^2} \left( m L_o + \sum_{i=1}^{m-1} 2\alpha^i M_{1,i+1} (m-i) \right), \quad (V.68)$$

$X_M$  — сопротивление взаимоиндукции между полупакетами

$$X_M = 2\pi f \frac{1}{m^2} \left( \sum_{k=1}^m (m-k+1) M_{1,k} + \sum_{k=1}^{m-1} k M_{m,k} \right). \quad (V.69)$$

Для нешихтованного пакета  $\alpha=1$ ,  $\beta=1$ . При расчете шихтованного однофазного пакета (рис. V.30, а) используется формула (V.68):  $X=X_L$ . В этом случае  $\alpha=-1$ ;  $\beta=2$ .

В приведенных выше формулах:

$m$  — число шин в шихтованном пакете или в нешихтованном полупакете;  $L_i$  — собственная индуктивность  $i$ -той шины;  $M_{1,i+1}$  — взаимная индуктивность  $i$ -той шины и  $(i+1)$ -той шины шихтованного пакета или одной половины нешихтованного пакета;  $M_{1,k}$  — взаимная индуктивность  $i$ -той шины одного полупакета и  $k$ -той шины второго полупакета;  $M_{m,k}$  — взаимная индуктивность  $m$ -ной шины одного полупакета и  $k$ -той шины второго полупакета.

Расчет всех собственных и взаимных индуктивностей производится по формулам (V.6), (V.12) и др. Блок-схема программы расчета однофазного шинного пакета представлена на рис. (V.31).

В случае, когда шинный пакет выполнен проводниками трубчатого сечения, расчет реактивного сопротивления ведется по формуле (V.49). Блок-схема программы расчета трубчатого пакета, сечение которого показано на рис. V.10, е, приведена на рис. V.32. Аналогично ведут-



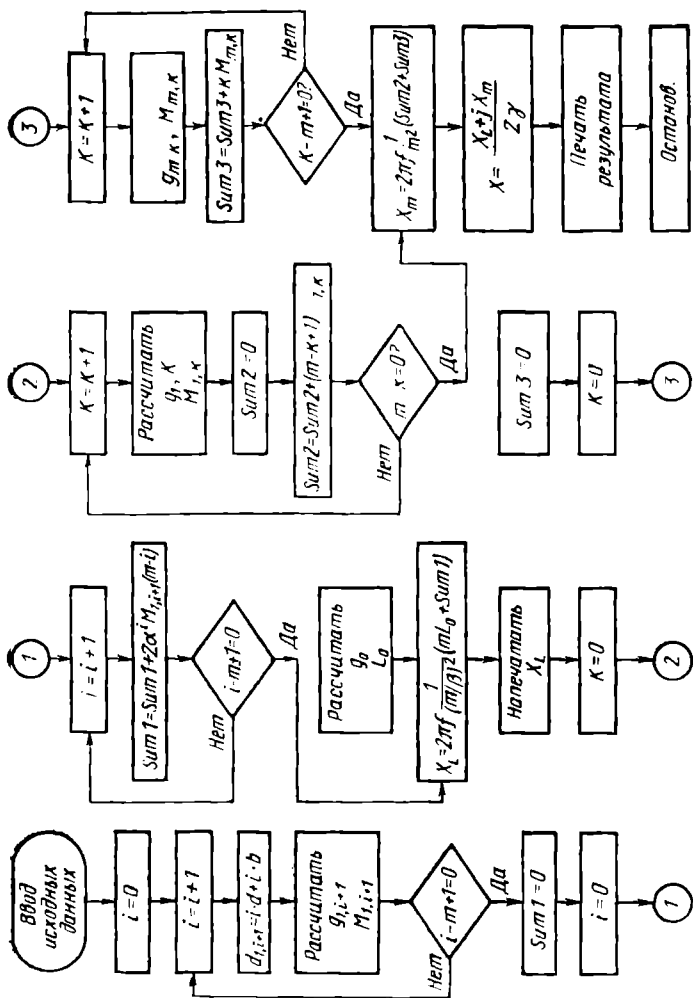


Рис. V.31. Блок-схема расчета шинного пакета

ся расчеты для всех других сечений трубчатого пакета. Ниже приводится результат расчета вариантов трубчатого пакета согласно приведенной выше блок-схеме.

На печать выведены исходные данные и результаты расчета.

#### Вариант номер 1

4 — число трубок в вертикальном ряду

6 — число трубок в горизонтальном ряду

2,5  $\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset$  — внешний радиус трубки

1,5  $\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset$  — внутренний радиус трубки

5  $\emptyset\emptyset, \emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset$  — длина короткой сети

12,  $\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset$  — параметр T

$\emptyset, 6 \supset \emptyset\emptyset\emptyset\emptyset$  — параметр A

$\emptyset, \emptyset$  — параметр B

$$X = 0,6885 \emptyset E - \emptyset 4$$

#### Вариант номер 2

1  $\emptyset$  — число трубок в вертикальном ряду

6 — число трубок в горизонтальном ряду

2,5  $\supset \emptyset\emptyset\emptyset\emptyset$  — внешний радиус трубки

1,5  $\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset$  — внутренний радиус трубки

1  $\emptyset\emptyset\emptyset, \emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset$  — длина короткой сети

8,  $\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset$  — параметр T

$\emptyset, 8 \emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset$  — параметр A

$\emptyset, 5 \emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset$  — параметр B

$$X = \emptyset,73439 E - \emptyset 4$$

#### Вариант номер 3

4 — число трубок в вертикальном ряду

2 — число трубок в горизонтальном ряду

2,5  $\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset$  — внешний радиус трубки

1,5  $\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset$  — внутренний радиус трубки

1  $\emptyset\emptyset, \emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset$  — длина короткой сети

9,  $\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset$  — параметр T

$\emptyset, 89 \emptyset\emptyset\emptyset\emptyset$  — параметр A

$\emptyset, \emptyset$  — параметр B

$$X = \emptyset,31 \emptyset 7 \emptyset E - \emptyset 4$$

#### Вариант номер 4

5 — число трубок в вертикальном ряду

$\emptyset$  — число трубок в горизонтальном ряду

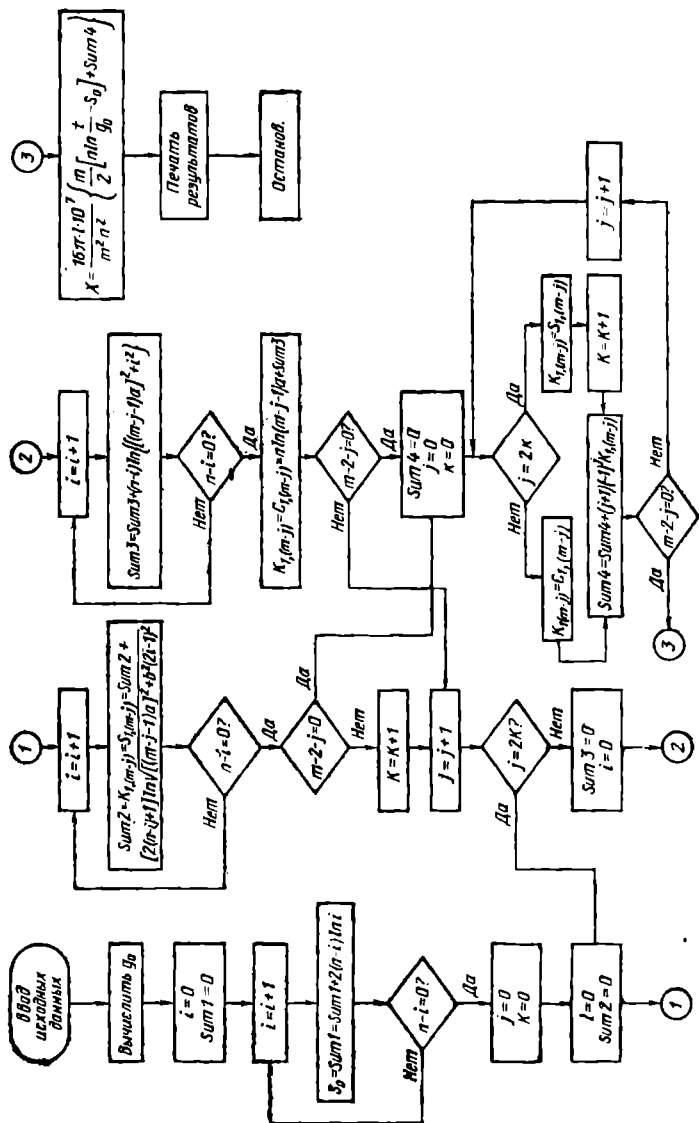


Рис. V.32. Блок-схема расчета трубчатого пакета

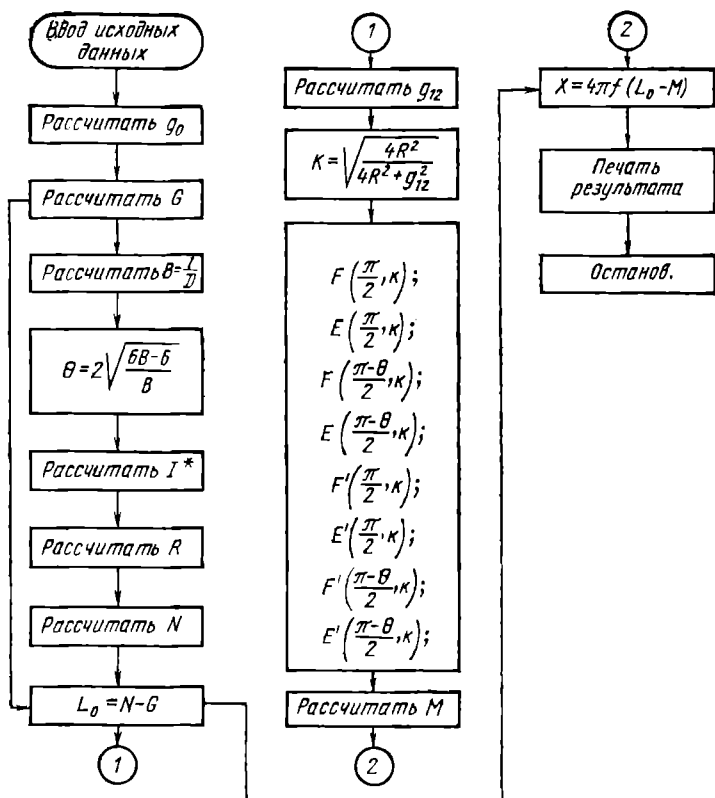


Рис. V.33. Блок-схема расчета гибких кабелей

2,5 ∅ ∅ ∅ ∅ — внешний радиус трубки

1,5 ∅ ∅ ∅ ∅ — внутренний радиус трубки

5 ∅ ∅, ∅ ∅ ∅ ∅ — длина короткой сети

8, ∅ ∅ ∅ ∅ — параметр T

∅, ∅ — параметр A

∅, ∅ — параметр B

$X = \emptyset,1 \emptyset 374 E - \emptyset 2$

Исходными данными для расчета реактивного сопротивления гибких кабелей руднотермических печей (рис. V.6) являются: длина проводника ( $l$ ); длина хорды, соответствующая длине проводника ( $D$ ); расстояние между пакетами кабелей с токами противоположных на-

правлений ( $t$ ); стороны эквивалентного сечения пакета гибких кабелей ( $a$  и  $b$ ).

Расчет индуктивности гибких кабелей ведется по формулам (V.1), (V.3), (V.4). Для определения величины  $M$  в выражении (V.1) в случае  $G=M$  необходимо воспользоваться формулой (V.32), в которой среднегеометрическое расстояние между пакетами гибких кабелей может быть определено по формуле (V.15). Центральный угол  $\varphi$ , необходимый для расчета по формуле (V.32), равен

$$\varphi = \sqrt{\frac{6(B-1)}{B}}, \text{ где } B = \frac{l}{D}.$$

Блок-схема для расчета реактивного сопротивления гибких кабелей представлена на рис. V.33.

Применение ЭВМ для расчета реактивного сопротивления гибких кабелей ДСП описано в работе [26].

## Глава VI

### РАСЧЕТ

### АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

#### 1. Сопротивление одиночного проводника

Активное сопротивление проводника при протекании постоянного тока и отсутствии внешних меняющихся по величине магнитных полей равно

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{S} [1 + \alpha(t_1 - t_0)], \quad (\text{VI.1})$$

где  $\rho_0$  — удельное сопротивление проводника при температуре  $t_0$ , Ом·см;  $l$  — длина проводника, см;  $\alpha$  — температурный коэффициент электрического сопротивления,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $t_1$  — температура, при которой определяется сопротивление проводника,  $^\circ\text{C}$ ;  $S$  — сечение проводника,  $\text{см}^2$ .

Величины  $\rho_0$  для проводников короткой сети приведены в табл. 2.2 главы II. Для меди, алюминия и силумина величина  $\rho_0$  дана при  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ , а для материалов электродов при их рабочей температуре. Сечение проводников принимается исходя из рекомендованных величин плотностей токов (табл. 6.6—6.8) и их температура  $t_1$  рассчитывается по методике, изложенной в п. 4 настоящей главы.

Активное сопротивление проводника при переменном токе выражается следующей формулой:

$$R_a = k_d R_0, \quad (\text{VI.2})$$

где  $k_d = \frac{\Delta P}{\Delta P_0} = \frac{I^2 R_a}{I^2 R_0}$  — коэффициент добавочных потерь;  $\Delta P$  — потери мощности в проводнике при переменном токе;  $P_0$  — потери мощности в проводнике при постоянном токе той же величины.

Коэффициент добавочных потерь

$$k_d = k_n k_\delta, \quad (\text{VI.3})$$

где  $k_n$  — коэффициент поверхностного эффекта;  $k_\delta$  — коэффициент близости. Коэффициент поверхностного эффекта учитывает неравномерное распределение тока по поперечному сечению уединенного проводника. Для проводников сплошного сечения радиуса  $r$  при  $mr \leq 2$

$$k_n = 1 + \frac{1}{12} \left( \frac{mr}{2} \right)^4 - \frac{1}{180} \left( \frac{mr}{2} \right)^8 + \dots; \quad (\text{VI.4})$$

при  $mr \geq 5$

$$k_n = \frac{mr}{2\sqrt{2}} + \frac{1}{4} + \frac{3}{16mr\sqrt{2}} - \frac{63}{256m^3r^3\sqrt{2}} - \dots \quad (\text{VI.5})$$

где  $m = \sqrt{\omega \mu \gamma}$ ;  $\omega = 2\pi f$ ;  $\mu = \mu_0 \mu_r$ ;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$  г/см — магнитная постоянная;  $\mu_r$  — относительная магнитная проницаемость проводника, равная единице для меди и алюминия.

Коэффициент поверхностного эффекта полых проводников круглого сечения, изготовленных из немагнитных материалов может быть определен по приближенной формуле

$$k_n = 1 + 3,3 \cdot 10^{-14} \left( \frac{\delta S}{d\rho} \right)^2 \left( \frac{f}{50} \right)^2, \quad (\text{VI.6})$$

где  $d$  — наружный диаметр проводника, см;  $\delta$  — толщина стенки проводника, см;  $S$  — площадь поперечного сечения трубчатого проводника, см<sup>2</sup>;  $\rho$  — удельное сопротивление материала проводника, Ом·см;  $f$  — частота переменного тока, Гц.

Определение коэффициента поверхностного эффекта и активного сопротивления проводников упрощается при пользовании кривыми рис. VI.1. На этих кривых  $f$  — частота, Гц;  $R_{100}$  — сопротивление 100 м рассматриваемого проводника постоянному току — определяется по выра-

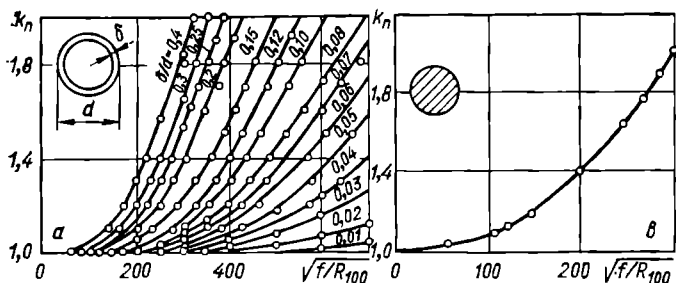


Рис. VI.1. Значения коэффициента поверхностного эффекта: *a* — для цилиндрического проводника круглого сечения; *б* — для полос прямоугольного сечения; *в* — для круглых проводников сплошного сечения

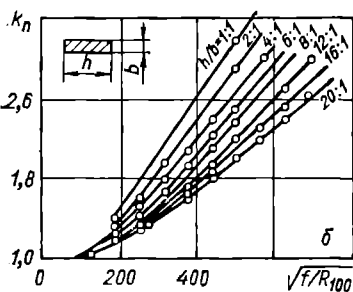


Рис. VI.2. Значения коэффициента добавочных потерь электродов Кб, в зависимости от  $k =$

$= \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{\rho}}$  для различных отношений диаметра распада к диаметру электрода  $D_0/D_3$

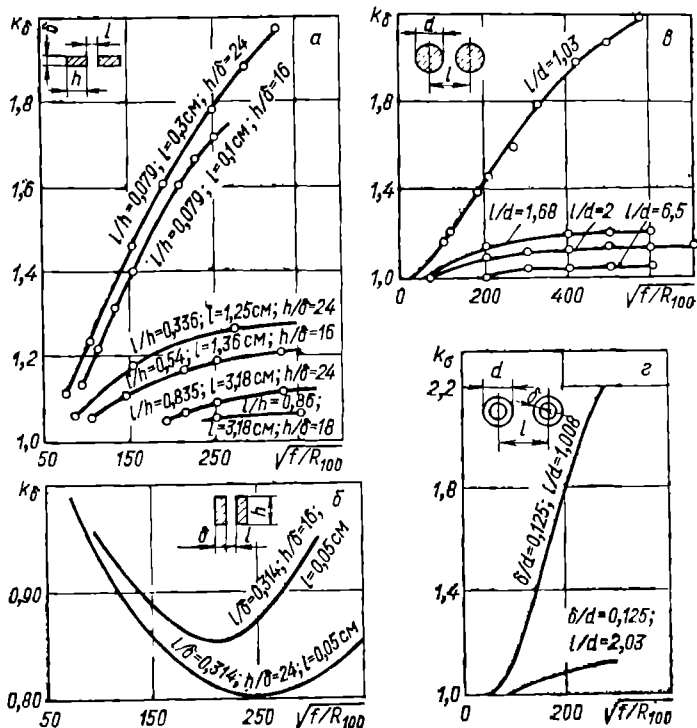


Рис. VI.3. Значения коэффициента близости:

а, б — для шин прямоугольного сечения; в — для проводников круглого сечения; г — для цилиндрических проводников круглого сечения

жению (VI.1), Ом. Для медных проводников диаметром до 20 мм и алюминиевых проводников диаметром до 30 мм коэффициент поверхностного эффекта при частоте 50 Гц составляет величину 1,03—1,06 и его обычно не учитывают.

Для наиболее употребляемых сечений медных проводников величина коэффициента поверхностного эффекта приведена в табл. 6.1. Для электродов печных установок коэффициент добавочных потерь  $k_d$  может быть определен по кривым рис. VI.2, построенным по результатам расчетов токораспределения по сечению электродов трехэлектродной круглой печи.

Коэффициент близости  $k_\delta$  учитывает неравномерное распределение тока по сечению проводника, вызванное



ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ

| Вид проводника                 | Значение коэффициента поверхностного |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                                | 50                                   | 60   | 70   | 80   | 100  | 120  | 140  |
| Шины толщиной $b$ , мм:        |                                      |      |      |      |      |      |      |
| 5                              | —                                    | 1,05 | —    | 1,07 | 1,12 | 1,14 | —    |
| 10                             | —                                    | 1,14 | —    | 1,17 | 1,20 | 1,22 | 1,29 |
| 15                             | —                                    | 1,18 | —    | 1,23 | 1,27 | 1,31 | 1,33 |
| 20                             | —                                    | 1,26 | —    | 1,34 | 1,38 | 1,40 | 1,45 |
| 25                             | —                                    | 1,35 | —    | 1,43 | 1,50 | 1,55 | 1,60 |
| Трубки толщиной $\delta$ , мм: |                                      |      |      |      |      |      |      |
| 10                             | 1,07                                 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | —    | 1,07 | —    |
| 12,5                           | 1,20                                 | 1,16 | 1,16 | —    | —    | —    | —    |
| 15                             | 1,31                                 | 1,29 | —    | —    | —    | —    | —    |

наличием соседних проводников, по которым протекает переменный ток. Коэффициенты близости для двух проводников различных конфигураций представлены на кривых рис. VI.3. Токопроводы коротких сетей характеризуются большим числом проводников и различным их расположением одного относительно другого. Поэтому приведенные выше значения коэффициентов близости двух проводников оказываются недостаточными для того, чтобы можно было судить о коэффициенте близости проводников сложных токопроводов. Экспериментальные данные показывают, что для одного проводника шихтованного пакета его можно в среднем оценить величиной 1,02—1,05, а для нешихтованного пакета и гибких кабелей 1,05—1,07.

## 2. Сопротивления проводников короткой сети

Короткие сети электрических установок представляют собой токопроводы с большим числом параллельно соединенных проводников, токораспределение по которым играет существенную роль в определении величины активных сопротивлений.

Для параллельного пучка проводников активное сопротивление равно

$$R_{\text{ап}} = R_{\text{п}} K_{\text{дн}} K_{\text{дж}},$$

эффекта при различных  $h$  (рис. VI.1, б) или  $d$  (р.с. VI.1, а), мм

| 160  | 180  | 200  | 220  | 240  | 260  | 280  | 300  | 320  |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| 1,32 | 1,35 | 1,37 | 1,38 | 1,40 | —    | —    | —    | —    |
| 1,35 | 1,38 | 1,42 | 1,46 | 1,49 | 1,51 | 1,53 | 1,55 | —    |
| 1,49 | 1,52 | 1,56 | 1,59 | 1,63 | 1,66 | 1,69 | 1,71 | 1,74 |
| 1,64 | 1,66 | 1,70 | 1,73 | 1,77 | 1,80 | 1,84 | 1,87 | 1,90 |
| —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |

$$\text{где } k_{\text{дн}} = n \sum_1^n I_i^2 / I^2; \quad R_{\text{п}} = 1 / \sum_1^n \frac{1}{R_{a_i}}; \quad R_{a_i} — \text{активное}$$

сопротивление переменному току одного проводника пакета;  $I_i$  — ток  $i$ -того проводника пакета;  $I = \sum_1^n I_i$ ;  $n$  — число параллельных проводников.

Коэффициент  $K_{\text{дн}}$  называют иногда коэффициентом внешнего поверхностного эффекта, учитывающего увеличение сопротивления вследствие неравномерного токо-распределения по отдельным проводникам пакета, т. е. вытеснение тока в крайние трубки пакета (рис. VI.6), аналогично тому как коэффициент поверхностного эффекта одиночного проводника учитывает увеличение сопротивления вследствие вытеснения тока по сечению к его поверхности. Если  $R_{a_i} = R = \text{const}$ , то  $R_{\text{п}} = \frac{R}{n}$  и тогда

$$R_{\text{ап}} = \frac{R}{n} k_{\text{дн}} k_{\text{дж}} \quad (\text{VI.7})$$

$k_{\text{дж}}$  — коэффициент добавочных потерь, учитывающий влияние потерь активной энергии в ферромагнитных конструкциях, возникающих от электромагнитных полей участка. Согласно данным работы [30],  $k_{\text{дж}} \approx 1,15$ . Вы-

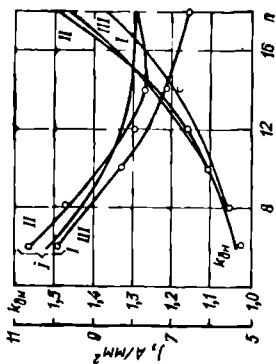


Рис. VI.4. Зависимость коэффициента внешнего поверхностного эффекта, а также значений плотностей тока в наиболее нагруженных трубках шинного пакета от числа трубок (I, II, III — см. рис. I.9, а)

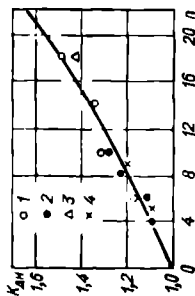


Рис. VI.5. Значения коэффициента неравномерности для гибких пакетов в зависимости от числа кабелей в вертикальном ряду: I — треугольник на шинном пакете, кабели МГЭ-1000,  $l = 140$  см; II — треугольник на шинном пакете, кабели КВС-1000,  $l = 240$  см; III — треугольник на шинном пакете, кабели МГЭ-1000,  $l = 160$  см; IV — треугольник на электродах, кабели МГЭ-1000,  $l = 550$  см

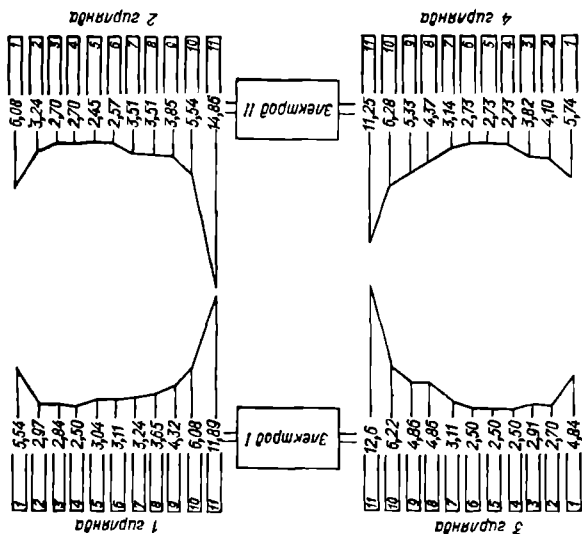


Рис. VI.6. Токораспределение по кабелям шестизлектродной ферросплавной печи

ражение (VI.7) получено в предположении равенства активных сопротивлений в каждом проводнике, что, как правило, с достаточной для практики точностью можно принять для большинства участков короткой сети (шинный пакет, компенсаторы, гибкие проводники). В случае, если это условие не полностью выполняется (например, для трубок электрододержателя) допустимо в качестве  $R_0$  принимать среднее значение сопротивления отдельных проводников.

Величина  $k_{\text{дн}}$  зависит от характера распределения тока по проводникам короткой сети и из-за большого числа проводников аналитическому расчету не поддается. Токораспределение определяется экспериментально на действующих печных установках, либо на моделях их коротких сетей и в ряде более простых случаев может быть рассчитано на ЭВМ. Накопленный экспериментальный материал позволил построить зависимость величины  $k_{\text{дн}}$  от числа проводников в одном вертикальном ряду.

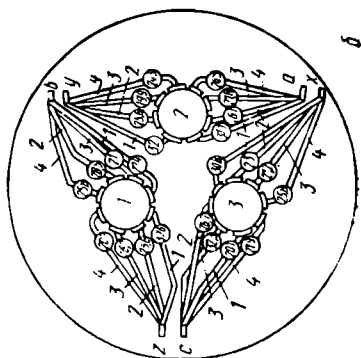
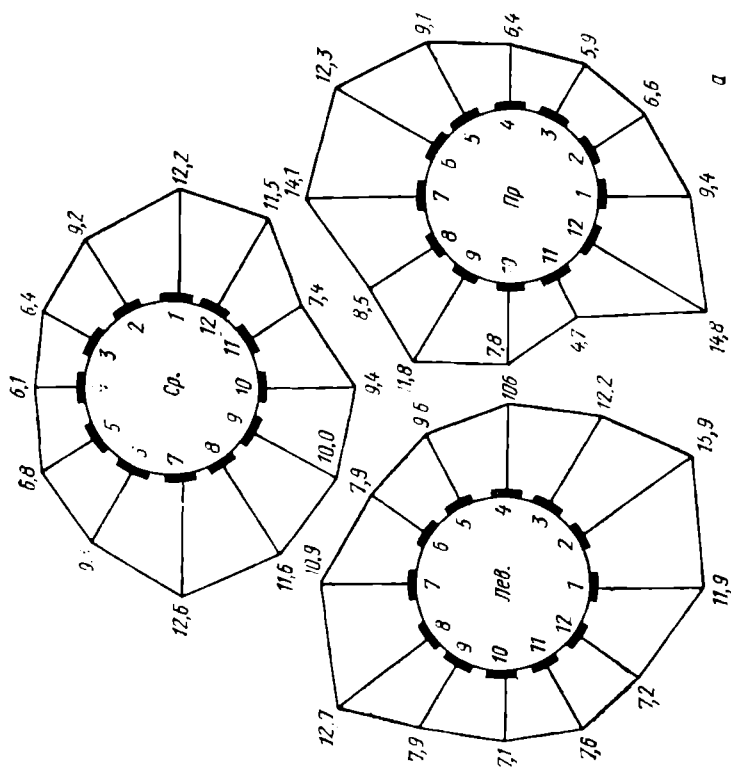
На рис. VI.4 представлены эти зависимости для трубчатых пакетов печей с прямоугольной ванной и схемой короткой сети звезда на трансформаторе (рис. 1.9, а), а на рис. VI.5 — для пакетов гибких кабелей.

На рис. VI.4 приведены значения плотностей тока в наиболее нагруженных трубках шинного пакета. Следует отметить, что токораспределение в значительной степени зависит от того, какие участки шинного пакета соединены последовательно друг с другом и от того, имеются ли параллельные перемычки. Так, в случае, если последовательно с шинными или трубчатыми пакетами включены отдельные обмотки НН печного трансформатора, то токораспределение будет значительно более равномерным, чем при объединении в общую точку начал и концов этих проводников.

В первом случае  $k_{\text{дн}} = 1,035$ , а во втором — 1,08. Неравномерное токораспределение имеет место не только в проводниках трубчатых и шинных пакетов, но и в пакетах гибких лент и кабелей, причем в этих проводниках неравномерность токораспределения выражена еще более ярко. На рис. VI.6 приведено токораспределение по кабелям шестиелектродной ферросплавной печи. Токораспределение по трубкам и щекам электрододержателя также в значительной степени зависит от переходных сопротивлений контактная щека — электрод.

На рис. VI.7 даны примерны токораспределения для

Рис. VI.7. Токораспределение по трубкам и щекам электрододержателя:  
 а — электрододержатель патронного типа (фосфорная печь РКЗ-72ф); б — электрододержатель с длинными трубками (ферросплавная печь)



электрододержателя патронного типа (рис. 1.13, в) (фосфорная печь) и для электрододержателя с длинными трубками (рис. 1.13, а) (ферросплавная печь). В обоих случаях наиболее нагруженными являются щеки, расположенные ближе к центру печи. Коэффициент  $k_{дн}$  для трубок электрододержателя лежит в пределах 1,15—1,25.

### 3. Потери энергии

#### в контактных соединениях и электроде

Сопротивление в месте перехода тока из одной контактной поверхности в другую называется переходным сопротивлением. Сопротивление контакта всегда больше, чем сплошного проводника таких же размеров и формы. Величина переходного сопротивления для любого вида контактного сопротивления может быть найдена по следующей формуле:

$$R_k = \frac{\epsilon}{Pm}, \quad (VI.8)$$

где  $\epsilon$  — коэффициент, учитывающий физические свойства материала контактов и характер их обработки;  $m$  — коэффициент, зависящий от формы контактов;  $m = 1 \div 0,3$  для контакта плоскость — плоскость;  $m = 1$ , для линейного контакта;  $m = 0,75$ ; при двух точках нажатия плиты и самоспекающегося электрода руднотермических печей по данным исследования Леннигипрохима  $m = 0,271$ ,  $P$  — нормальное усилие сжатия контактирующих элементов, Н.

Новейшие исследования в теории электрического контакта показали, что коэффициенты  $\epsilon$  и  $m$  и соответственно значение переходного сопротивления контактов без пленок определяются топографией поверхности металла, и, таким образом, для каждого конкретного случая контактирования различных металлов с разной обработкой поверхности получаются различные значения  $R_k = f(P)$ . Это означает, что переходное сопротивление следует рассматривать как статистическую величину [7]. Экспериментально установлено, что в пределах одного и того же вида контактных соединений площадь контакта незначительно влияет на его переходное сопротивление. В этом случае оно зависит в основном от приложенного давления (от усилия сжатия контактирующих поверхностей). Ниже приведены уравнения для переходных сопротивлений контактов плоских шин, учитываю-

| Материалы контактов | $\epsilon, \text{ Ом} \cdot \text{Н}^m$ | Материалы контактов                                                        | $\epsilon, \text{ Ом} \cdot \text{Н}^m$ |
|---------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Алюминий — алюминий | 0,0045                                  | Медь — медь                                                                | 0,0004                                  |
| Алюминий — латунь   | 0,002                                   | Медь — медь<br>(лужение поверхности)                                       | 0,0001                                  |
| Алюминий — медь     | 0,001                                   | Сталь — сталь                                                              | 0,008                                   |
| Алюминий — сталь    | 0,0044                                  | Сталь — графит                                                             | 0,008                                   |
| Латунь — графит     | 0,002                                   | Кожух самоспекающегося электрода — медная плита<br>(в начале эксплуатации) | 0,0022                                  |
| Латунь — латунь     | 0,0007                                  |                                                                            |                                         |
| Латунь — медь       | 0,0004                                  |                                                                            |                                         |
| Латунь — сталь      | 0,0003                                  |                                                                            |                                         |

щие их работу при давлении примерно 10 МПа, что соответствует давлению болтовых соединений:

медь—медь

$$R_k = \frac{9 \cdot 10^{-1}}{P^{0,92}} \frac{1}{A_n^{0,11}} ; \quad (\text{VI.8a})$$

медь—алюминий

$$R_k = \frac{12 \cdot 10^{-1}}{P^{0,91}} \frac{1}{A_n^{0,12}} ; \quad (\text{VI.8б})$$

алюминий—алюминий

$$R_k = \frac{14 \cdot 10^{-1}}{P^{0,9}} \frac{1}{A_n^{0,13}} , \quad (\text{VI.8в})$$

где  $A_n$  — поверхность,  $\text{мм}^2$ . Значения  $\epsilon$  для различных материалов контактов приведены в табл. 6.2.

Следует отметить, что ввиду того, что величина контактного сопротивления является величиной статистической и зависит от многих факторов, она редко рассчитывается, а чаще всего устанавливается экспериментально путем измерений.

Электрическое сопротивление контакта считается удовлетворительным, если оно не превышает (5—10 %) электрического сопротивления сплошного проводника на длине, равной длине контактного соединения. Это условие является основным для обеспечения надежной работы контактных соединений участков короткой сети.

В отличие от вышеприведенных контактных соединений сопротивление контактных щек (плит) с самоспекающимся электродом в процессе работы изменяется в довольно широких пределах, так как кроме того, что они работают в специфических условиях (запыленность, высокая температура, различные давления на плитах, разное состояние поверхности электродов) в процессе работы имеет место перепуск электродов, при котором резко изменяется состояние контактирующих поверхностей.

Эти условия приводят к тому, что распределение нагрузки по контактным плитам носит неравномерный характер. При этом следует иметь в виду, что на характер токораспределения по контактным плитам оказывает влияние и эффект близости между трубками подвижной части, по которым ток от гибких пакетов подводится к контактным плитам. Этим объясняется наличие максимальных значений токов у тех контактных плит, которые обращены к центру печи. Вместе с тем следует отметить, что характер токораспределения по контактным плитам обуславливается, главным образом, реактивным сопротивлением токоведущих труб.

На основании большого числа руднотермических печей [36] можно рекомендовать среднюю величину контактного сопротивления плит с самоспекающимся электродом  $R_{кп} = (0,2—0,25)$  мОм при давлении 0,015 МПа. Учитывая, что на мощных печах устанавливают несколько контактных плит ( $n_k$ ) на одном электроде, в расчетах общее сопротивление контакта плита—электрод на фазу (на электрод) может быть принято равным

$$R_{к.п} = 0,25/n_k \text{ мОм,} \quad (VI.9)$$

где  $n_k$  — число контактных плит на электрод. Наибольшую величину активного сопротивления, определяющего потери мощности в печной установке, составляют электроды. На основании большого числа измерений, произведенных авторами и на основании литературных данных, величина удельного сопротивления самоспекающихся электродов в зоне, определяющей потери энергии  $\rho_s = (60 \div 70) 10^{-4}$  Ом·см.

Длина электрода, на которой имеют место потери энергии, равна

$$l \cong l_1 + l_2,$$

где  $l_1$  — длина электрода от середины контактных щек до колошника;  $l_2$  — длина электрода ниже колошника,



на которой происходит потеря энергии ( $l_2 \cong 0,5$  м) [16]. Некоторые исследователи считают, что на этой длине электрода имеет место не потеря энергии, а ее полезное выделение.

### *Потери в металлических конструкциях*

В металлических нетоковедущих конструкциях, находящихся вблизи токопроводов, возникают вихревые токи, которые приводят к увеличению потерь и увеличению эквивалентного активного сопротивления токопровода [35]. Металлоконструкции из немагнитного материала оказывают незначительное влияние на параметры токопровода и потери в них, и их, как правило, можно не учитывать. Лишь в тех случаях, когда образуется замкнутый контур вблизи токонесущих, не сбиблированных проводников рекомендуется его разрывать, чтобы исключить наводки значительных токов, которые могут оказаться опасными для самой конструкции.

Увеличение активного сопротивления потерь в печном контуре из-за потерь в металлических конструкциях приближенно оценивается величиной  $\approx 15\text{—}25\%$  [1] от общего активного сопротивления, определяющего потери. Таким образом,  $\kappa_{\text{дж}} \approx 1,15\text{—}1,25$ . При конструировании печей следует обращать внимание не только на потери в железе, но и на местный нагрев отдельных узлов, что может вызвать аварийные остановки печей. Во избежание опасных перегревов ферромагнитные конструкции следует располагать на расстоянии 300—400 мм от токопроводов.

## **4. Тепловой расчет проводников короткой сети**

Предельная допустимая температура нагрева проводников короткой сети с учетом дополнительного нагрева от окружающей среды при длительной работе должна быть равна 90 °С [11]. Такая температура принята из условий обеспечения нормальной механической прочности проводников и условия работы электрической изоляции, а также контактных соединений. При кратковременных нагревах аварийными токами короткого замыкания допустимы предельные температуры для медных шин 300 °С, а для алюминиевых 200 °С. Так как кратности токов к.з. для установок невелики, ограничиваются проверкой теплового режима для длительных рабочих токов.

Проводники короткой сети могут иметь один из трех видов охлаждения:

а) естественное воздушное охлаждение, как это имеет место у шинных пакетов и длинных голых кабелей сталеплавильных печей;

б) естественное воздушное охлаждение с дополнительным отводом тепла в торцы через водоохлаждаемые контакты. Подобный вид охлаждения имеют кабели и ленты руднотермических печей;

в) водяное охлаждение, как это имеет место у трубчатых пакетов, трубок электрододержателя и водоохлаждаемых кабелей. Во всех случаях целесообразно рассчитать температуру отдельных проводников, предварительно определив их ток и сопротивление.

### *Проводник*

*с естественным воздушным охлаждением*

Определение температуры проводников с естественным охлаждением ведут методом последовательных приближений. Задаваясь температурой проводника, рассчитывают количество энергии, выделяемой на единицу длины проводника. Обычно при расчетах длина участка проводника равна 1 см:

$$P_{\text{в}} = I^2 R_{\text{в}} \text{ Вт.} \quad (\text{VI.10})$$

Далее определяют количество тепла, отданного с поверхности лучеиспусканием:

$$Q_{\text{л}} = 5,7\epsilon \left[ \left( \frac{T_1}{1000} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{1000} \right)^4 \right] F \text{ Вт,} \quad (\text{VI.11})$$

где  $T_1$  и  $T_2$  — соответственно абсолютные температуры проводника и окружающей среды, К;  $\epsilon$  — постоянная лучеиспускания;  $F$  — поверхность проводника, см<sup>2</sup>.

Для жесткого пакета тонких шин расчетную величину поверхности для определения величины теплоотдачи излучением можно принять равной  $(1-\varphi)F$ , где

$$\varphi = \sqrt{\left( \frac{d}{c} \right)^2 + 1} - \frac{d}{c}.$$

Для различных окисленных материалов  $\epsilon$  имеет следующие значения: сталь 0,79; Cu 0,5—0,7, Al 0,11, латунь 0,6.

Теплоотдача естественной конвекцией с вертикальной поверхности определяется из выражения [32]:

$$Q_{\text{к}} = 1,8 \cdot 10^{-4} \alpha (t_1 - t_2)^{1,25} F \text{ Вт,} \quad (\text{VI.12})$$

где  $t_1$  и  $t_2$  — температуры соответственно проводника и окружающего воздуха, °C;  $\alpha$  — коэффициент, зависящий от высоты теплоотдающей плоскости ( $c$ ).

Значения приведены ниже:

|                                    |        |      |      |      |      |
|------------------------------------|--------|------|------|------|------|
| Высота плоскости $c$ , см. . . . . | 100—30 | 20   | 15   | 10   | 5    |
| $\alpha$ . . . . .                 | 1,00   | 1,35 | 1,53 | 1,76 | 2,70 |

Значения  $(t_1 - t_2)^{1,25}$  для разных значений  $\Delta t = (t_1 - t_2)$  приведены ниже:

|                             |      |       |       |       |     |
|-----------------------------|------|-------|-------|-------|-----|
| $\Delta t$ , °C. . . . .    | 35   | 40    | 45    | 50    | 55  |
| $\Delta t^{1,25}$ . . . . . | 85,1 | 100,6 | 116,5 | 133   | 150 |
| $\Delta t$ , °C. . . . .    | 60   | 65    |       | 70    | 75  |
| $\Delta t^{1,25}$ . . . . . | 167  | 185   |       | 202,5 | 220 |

Далее сопоставляется суммарная величина теплоотдачи  $Q_T = Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}}$  с величиной выделения энергии и задаваясь новой температурой, ведут расчет до тех пор, пока  $Q_T = Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}}$  и  $P_{\text{в}}$  не совпадут.

Иногда в практике расчетов принимают графическое решение задачи, когда строят кривую  $Q_T = f(t_1)$  и нахо-

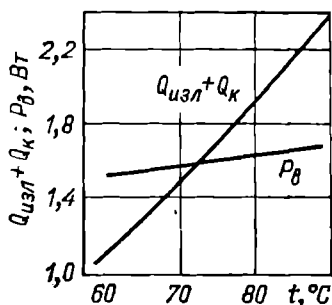


Рис. VI.8. Зависимость мощности теплоотдачи излучением, конвекцией и мощности тепловыделения от температуры

дят точку ее пересечения с кривой  $P_{\text{в}}$ , которая будет соответствовать расчетной температуре (рис. VI.8).

Следует иметь в виду, что для открытых печей имеет место перегрев шин в зоне действия теплового поля колошника печи. В табл. 6.3 даны результаты замеров температуры шин для участка с обычным охлаждением и в зоне действия колошника ферросплавной печи. Как видно из таблицы, дополнительный нагрев шин в этом случае составляет  $\approx 40$  °C.

#### Расчет теплового баланса пакета медных шин

Пример 1. Определить температуру одиночной медной шины сечением  $30 \times 100 = 3000$  мм<sup>2</sup> при температуре среды  $t_{\text{ср}} = 25$  °C и токе

## ТЕМПЕРАТУРА МЕДНОЙ ШИНЫ

| Участок                                               | Температура шин, °C |                   |                   |                   |
|-------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                                                       | при токе<br>30 кА   | при токе<br>40 кА | при токе<br>42 кА | при токе<br>44 кА |
| Участок в зоне действия<br>внешних тепловых излучений | 145                 | 150               | 160               | 170               |
| Участок с нормальным ох-<br>лаждением . . . . .       | 105                 | 110               | 120               | 130               |

$I=3800$  А. Излучающая поверхность на длине 1 см  $F=2(3+10)=26$  см<sup>2</sup>.

Мощность теплоотдачи излучением находится по формуле (VI.11):

$$\text{При } t_{\text{ш}} = 60^\circ \text{C} \quad Q_{\text{л}} = 5,7 \cdot 0,6 \left[ \left( \frac{60 + 273}{1000} \right)^4 - \left( \frac{25 + 273}{1000} \right)^4 \right] 26 = 0,392 \text{ Вт.}$$

Мощность теплоотдачи конвекцией находится по формуле (VI.12)

$$\text{При } t_{\text{ш}} = 60^\circ \text{C} \quad Q_{\text{к}} = 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot 1,76 \cdot 85,1 \cdot 26 = 0,702 \text{ Вт.}$$

Мощность тепловыделения на участке шины длиной 1 см находится по формуле (VI.10):

$$\text{При } t_{\text{ш}} = 60^\circ \text{C} \quad P_{\text{в}} = 3,82 \cdot 10^6 \cdot 0,018 \frac{0,01}{3000} [1 + 0,004 (60 - 20)] 1,68 = 1,553 \text{ Вт,}$$

где 1,68 — коэффициент поверхностного эффекта найден из рис. VI.1, б. Аналогично находятся мощности теплоотдачи излучением и конвекцией, а также мощность тепловыделения на участке шины при  $t=70^\circ \text{C}$ ,  $80^\circ \text{C}$ ,  $90^\circ \text{C}$  (табл. 6.4).

ТАБЛИЦА 6.4

МОЩНОСТЬ ТЕПЛООТДАЧИ ИЗЛУЧЕНИЕМ И КОНВЕКЦИЕЙ,  
МОЩНОСТЬ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ НА УЧАСТКЕ ШИНЫ

| Мощность, Вт                             | Мощность теплоотдачи излучением и конвекцией,<br>мощность тепловыделения на участке шин при различной<br>температуре |       |       |       |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
|                                          | 60 °C                                                                                                                | 70 °C | 80 °C | 90 °C |
| $Q_{\text{л}}$                           | 0,392                                                                                                                | 0,529 | 0,679 | 0,843 |
| $Q_{\text{к}}$                           | 0,701                                                                                                                | 0,960 | 1,236 | 1,524 |
| $P_{\text{в}}$                           | 1,519                                                                                                                | 1,574 | 1,617 | 1,675 |
| $Q_{\text{т}}=Q_{\text{л}}+Q_{\text{к}}$ | 1,094                                                                                                                | 1,489 | 1,915 | 2,367 |

Максимальная температура медной шины найдена путем пересечения значений кривых  $Q_T$  и  $P_B$  (рис. VI.8) и составляет  $72,5^\circ\text{C}$ .

*Проводники  
с естественным воздушным охлаждением  
и водоохлаждаемыми торцами*

В случае короткого проводника длиной до 3—4 м и охлаждаемого водой с торцов, температура по длине будет неодинаковой: в центре проводника — максимальной, а с торцов — близкой к температуре воды. Температура проводника в центре может быть определена из выражений [38]:

$$t_{\max} = \frac{t_0 - \frac{n}{m^2}}{\operatorname{ch}\left(m \frac{l}{2}\right)} + \frac{n}{m^2} \text{ при } m^2 = \frac{\alpha_k v}{\lambda F} - \frac{\beta q_{v_0} \cdot 1,163}{\lambda} \quad 0 \quad (\text{VI.13})$$

$$t_{\max} = \frac{t_0 + \frac{n}{|m^2|}}{\cos\left(|m| \frac{l}{2}\right)} - \frac{n}{|m^2|} \text{ при } m^2 < 0; \quad (\text{VI.14})$$

$$n = \frac{1,163 q_{v_0}}{\lambda} + \frac{\alpha_k v}{\lambda F} t_{\text{ср}}, \quad q_{v_0} = 0,86 k_{\pi} k_{\delta} \rho j^2, \quad (\text{VI.15})$$

где  $t_{\text{ср}}$  — температура среды,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $t_0$  — температура заделки (с охлаждением контактов водой,  $^\circ\text{C}$ );  
 $F$  — сечение проводника,  $\text{мм}^2$ ;  
 $\rho$  — удельное сопротивление,  $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ;  
 $\alpha_k = 1,163 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  — коэффициент конвективной теплоотдачи;  
 $\lambda = 393,09 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$  — коэффициент теплопроводности;  
 $\beta = 0,004 \frac{1}{^\circ\text{C}}$  — температурный коэффициент;  
 $j$  — плотность тока,  $\text{А/мм}^2$ ;  
 $l$  — длина лент,  $\text{мм}$ ;  
 $v$  — периметр пакета,  $\text{м}$ ;  
 $k_{\pi}$  — коэффициент поверхностного эффекта;  
 $k_{\delta}$  — коэффициент близости.

**Пример 2.** Определить максимальную температуру пакета медных лент длиной 3 м, сечением  $20 \times 300 = 6000 \text{ мм}^2$  при температуре среды  $t_{\text{ср}} = 35^\circ\text{C}$ , температуре заделки  $t_0 = 40^\circ\text{C}$ .

$$j = 1,22 \frac{A}{\text{мм}^2}, \quad k_{\pi} = 1,7, \quad k_6 = 1,05.$$

$$q_{v_0} = 0,86 \cdot 1,7 \cdot 1,05 \cdot 0,0162 \cdot 1,22^2 = 0,037;$$

$$n = 1,163 \frac{0,037}{393,09} + \frac{11,63 \cdot 0,64}{393,09 \cdot 6000} 35 = 109,6 \cdot 10^{-6} + 110 \cdot 10^{-6} =$$

$$= 219,5 \cdot 10^{-6};$$

$$m^2 = \frac{11,63 \cdot 0,64}{393,09 \cdot 6000} - \frac{0,004 \cdot 0,037 \cdot 1,163}{393,09} = (3,15 -$$

$$- 0,438) \cdot 10^{-6} = 2,712 \cdot 10^{-6};$$

$$m = 1,645 \cdot 10^{-3};$$

$$t_{\max} = \frac{40,0 - 80,8}{\text{ch}(1,5 \cdot 1,645)} + 80,8 = \frac{-40,8}{5,95} + 80,8 = 73,94^\circ \text{C}.$$

### *Водоохлаждаемые проводники*

При водяном охлаждении теплоотдача проводника может быть определена из выражения

$$Q_{\tau} = \alpha F \Delta t \text{ Вт}, \quad (\text{VI.16})$$

$$\alpha = 2330 + 1160 W_{\text{в}} / \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}), \quad (\text{VI.17})$$

где  $W_{\text{в}}$  — скорость течения воды, которая выбирается в пределах 0,5—2,0 м/с;

$F$  — внутренняя поверхность трубы;

$\Delta t$  — теплорепад между температурой проводника и охлаждающей водой.

Обычно расчет ведут исходя из принятой скорости воды и определяют  $\Delta t$  при имеющих место тепловыделениях в трубошинах. Кроме того, проверяется температура на выходе воды:

$$t_{\text{вых}} = t_{\text{вх}} + \frac{P_{\tau}}{0,86 \frac{\pi d_{\text{в}}^2}{4} W_{\text{в}} \cdot 3600}, \quad (\text{VI.18})$$

где  $d_{\text{в}}$  — внутренний диаметр проводника;

$t_{\text{вх}}$  — температура воды на входе.

Необходимо иметь такую скорость воды, чтобы температура на выходе не превышала  $50^\circ \text{C}$ . Однако не следует выбирать скорость воды менее 0,5—1,0 м/с, так как может наблюдаться заиливание трубчатых проводников.

## **5. Допустимые нагрузки проводников**

Допустимая нагрузка на проводники с естественным воздушным охлаждением определяется из выражения

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{Q_T F}{R_a}}. \quad (\text{VI.19})$$

В табл. 6.5—6.8 приведена допустимая нагрузка на медные и алюминиевые шины различных сечений [10].

Для проводников, охлаждаемых с торцов водой, эти нагрузки будут выше и они приведены в табл. 6.9.

В табл. 6.5—6.8 токовые нагрузки приведены для неокрашенных шин, установленных на ребро, при зазоре между шинами 30 мм для шин высотой 300 мм и 20 мм для шин высотой 250 мм и менее.

При охлаждении проводников водой определяющим будет не допустимая нагрузка, которая лежит в диапа-

ТАБЛИЦА 6.5

ДОПУСТИМЫЕ ДЛИТЕЛЬНЫЕ НАГРУЗКИ ТОКОМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ ОДНОФАЗНЫХ ТОКОПРОВОДОВ ИЗ ШИХТОВАННОГО ПАКЕТА АЛЮМИНИЕВЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ШИН

| Размер<br>полосы,<br>мм | Токовые нагрузки, А, при числе полос в пакете |      |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------|-----------------------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                         | 2                                             | 4    | 6      | 8      | 12     | 16     | 20     | 24     |
| 100×10                  | 1250                                          | 2480 | 3 705  | 4 935  | 7 380  | 9 850  | 12 315 | 14 850 |
| 120×10                  | 1455                                          | 2885 | 4 325  | 5 735  | 8 600  | 11 470 | 14 315 | 17 155 |
| 140×10                  | 1685                                          | 3330 | 4 980  | 6 625  | 9 910  | 13 205 | 16 490 | 19 785 |
| 160×10                  | 1870                                          | 3705 | 5 545  | 7 380  | 11 045 | 14 710 | 18 375 | 22 090 |
| 180×10                  | 2090                                          | 4135 | 6 185  | 8 225  | 12 315 | 16 410 | 20 490 | 24 610 |
| 200×10                  | 2310                                          | 4560 | 6 825  | 9 090  | 13 585 | 18 105 | 22 605 | 27 120 |
| 250×10                  | 2865                                          | 5595 | 8 390  | 11 185 | 16 640 | 22 185 | 27 730 | 33 275 |
| 250×20                  | 3910                                          | 7755 | 11 560 | 15 415 | 23 075 | 30 740 | 38 350 | 46 060 |
| 300×10                  | 3330                                          | 6600 | 9 900  | 13 200 | 19 625 | 26 170 | 32 710 | 39 200 |
| 300×20                  | 4560                                          | 8995 | 13 440 | 17 880 | 26 790 | 35 720 | 44 605 | 53 485 |

ТАБЛИЦА 6.6

ДОПУСТИМЫЕ ДЛИТЕЛЬНЫЕ НАГРУЗКИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ ОДНОФАЗНЫХ ТОКОПРОВОДОВ ИЗ ШИХТОВАННОГО ПАКЕТА МЕДНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ШИН

| Размер<br>полосы,<br>мм | Токовые нагрузки, А при числе полос в пакете |      |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------|----------------------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                         | 2                                            | 4    | 6      | 8      | 12     | 16     | 20     | 24     |
| 100×10                  | 1880                                         | 3590 | 5 280  | 7 005  | 10 435 | 13 820 | 17 250 | 20 680 |
| 120×10                  | 2185                                         | 4145 | 6 110  | 8 085  | 12 005 | 15 935 | 19 880 | 23 780 |
| 140×10                  | 2475                                         | 4700 | 6 920  | 9 135  | 13 585 | 18 050 | 22 465 | 26 930 |
| 160×10                  | 2755                                         | 5170 | 7 670  | 10 150 | 15 040 | 19 930 | 24 910 | 29 800 |
| 180×10                  | 3035                                         | 5735 | 8 440  | 11 140 | 16 545 | 21 900 | 27 355 | 32 760 |
| 200×10                  | 3335                                         | 6300 | 9 280  | 12 220 | 18 140 | 24 065 | 29 985 | 35 910 |
| 250×10                  | 4060                                         | 7660 | 11 235 | 14 805 | 21 930 | 29 140 | 36 235 | 43 430 |
| 300×10                  | 4840                                         | 9135 | 13 395 | 17 670 | 26 225 | 34 780 | 43 380 | 51 700 |

ТАБЛИЦА 67

ДОПУСТИМЫЕ ДЛИТЕЛЬНЫЕ НАГРУЗКИ ТОКОМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ ТОКОПРОВОДОВ ИЗ ШИХТОВАННОГО ПАКЕТА АЛЮМИНИЕВЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ШИН

| Размер<br>полосы,<br>мм | Токовые нагрузки, А при числе полос в пакете |      |        |        |        |        |
|-------------------------|----------------------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|
|                         | 3                                            | 6    | 9      | 12     | 18     | 24     |
| 100×10                  | 1240                                         | 2470 | 3690   | 4920   | 7 390  | 9 900  |
| 120×10                  | 1445                                         | 2885 | 4300   | 5735   | 8 590  | 11 435 |
| 140×10                  | 1665                                         | 3320 | 4955   | 6605   | 9 895  | 13 190 |
| 160×10                  | 1850                                         | 3695 | 5525   | 7365   | 11 025 | 14 725 |
| 180×10                  | 2070                                         | 4125 | 6155   | 8210   | 12 295 | 16 405 |
| 200×10                  | 2280                                         | 4550 | 6 790  | 9 055  | 13 565 | 18 080 |
| 250×10                  | 2795                                         | 5595 | 8 320  | 11 090 | 16 640 | 22 185 |
| 250×20                  | 3880                                         | 7710 | 11 540 | 15 385 | 23 010 | 30 705 |
| 300×10                  | 3300                                         | 6600 | 9 815  | 13 085 | 19 625 | 26 130 |
| 300×20                  | 4500                                         | 8960 | 13 395 | 17 860 | 26 760 | 35 655 |

ТАБЛИЦА 6.8

ДОПУСТИМЫЕ ДЛИТЕЛЬНЫЕ НАГРУЗКИ ТОКОМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ ТОКОПРОВОДОВ ИЗ ШИХТОВАННОГО ПАКЕТА МЕДНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ШИН

| Размер<br>полосы,<br>мм | Токовые нагрузки, А при числе полос в пакете |      |        |        |        |        |
|-------------------------|----------------------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|
|                         | 3                                            | 6    | 9      | 12     | 18     | 24     |
| 100×10                  | 1825                                         | 3530 | 5 225  | 6 965  | 10 340 | 13 740 |
| 120×10                  | 2105                                         | 4070 | 6 035  | 8 000  | 11 940 | 15 885 |
| 140×10                  | 2395                                         | 4615 | 6 845  | 9 060  | 13 170 | 17 955 |
| 160×10                  | 2660                                         | 5125 | 7 565  | 10 040 | 14 945 | 19 850 |
| 180×10                  | 2930                                         | 5640 | 8 330  | 11 015 | 16 420 | 21 810 |
| 200×10                  | 3220                                         | 6185 | 9 155  | 12 090 | 18 050 | 23 925 |
| 250×10                  | 3900                                         | 7480 | 11 075 | 14 625 | 21 810 | 28 950 |
| 300×10                  | 4660                                         | 8940 | 13 205 | 17 485 | 25 990 | 34 545 |

зоне 10—15 А/мм<sup>2</sup>, а экономическая плотность тока, равная для проводников 3,0—3,5 А/мм<sup>2</sup>. В практике конструирования коротких сетей сечения ее элементов вначале выбирают исходя из величин средних расчетных плотностей токов (табл. 6.10), а уже после ее проектной разработки проверяют тепловые режимы проводников.

В соответствии с разделом VII ПУЭ—76 для токопроводов на номинальный ток 10 кА и более должна рассчитываться динамическая устойчивость при коротких замыканиях. Вопросы динамической устойчивости токопроводов рассмотрены в четвертой главе. Следует



отметить, что на практике иногда ограничиваются выполнением рекомендаций по расстоянию между зажимами, которое для токопроводов короткой сети с медными

ТАБЛИЦА 6.9

ДОПУСТИМАЯ ПЛОТНОСТЬ ТОКА ЛЕНТ С ЕСТЕСТВЕННЫМ  
ОХЛАЖДЕНИЕМ ВОЗДУШНОЙ СРЕДОЙ И ВОДООХЛАЖДАЕМЫМИ  
КОНТАКТАМИ

| Размеры<br>пакета<br>лент, мм | Сечение<br>пакета<br>лент, мм | Допустимая плотность тока, А/мм <sup>2</sup> ( $t_{\text{max}} = 90^\circ \text{C}$ )<br>при различных длинах лент |                  |                  |                  |                  |                  |
|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                               |                               | $l = 900$<br>мм                                                                                                    | $l = 1200$<br>мм | $l = 1500$<br>мм | $l = 2000$<br>мм | $l = 2500$<br>мм | $l = 3000$<br>мм |
| 10×90                         | 900                           | 3,17                                                                                                               | 2,86             | 2,70             | 2,60             | 2,55             | 2,51             |
| 10×100                        | 1000                          | 3,15                                                                                                               | 2,85             | 2,69             | 2,57             | 2,52             | 2,49             |
| 10×110                        | 1100                          | 3,12                                                                                                               | 2,84             | 2,68             | 2,55             | 2,49             | 2,46             |
| 10×120                        | 1200                          | 3,10                                                                                                               | 2,82             | 2,66             | 2,52             | 2,46             | 2,44             |
| 10×130                        | 1300                          | 3,06                                                                                                               | 2,79             | 2,63             | 2,49             | 2,43             | 2,40             |
| 10×140                        | 1400                          | 3,03                                                                                                               | 2,74             | 2,59             | 2,46             | 2,40             | 2,37             |
| 10×150                        | 1500                          | 3,00                                                                                                               | 2,69             | 2,55             | 2,43             | 2,37             | 2,34             |
| 10×160                        | 1600                          | 2,97                                                                                                               | 2,65             | 2,51             | 2,40             | 2,34             | 2,31             |
| 10×170                        | 1700                          | 2,94                                                                                                               | 2,62             | 2,48             | 2,37             | 2,31             | 2,28             |
| 10×180                        | 1800                          | 2,92                                                                                                               | 2,59             | 2,46             | 2,35             | 2,29             | 2,26             |
| 10×190                        | 1900                          | 2,90                                                                                                               | 2,57             | 2,44             | 2,34             | 2,28             | 2,25             |
| 10×200                        | 2000                          | 2,89                                                                                                               | 2,55             | 2,43             | 2,33             | 2,27             | 2,24             |
| 12×90                         | 1080                          | 3,02                                                                                                               | 2,69             | 2,54             | 2,43             | 2,36             | 2,32             |
| 12×100                        | 1200                          | 3,00                                                                                                               | 2,67             | 2,52             | 2,39             | 2,33             | 2,30             |
| 12×110                        | 1320                          | 2,97                                                                                                               | 2,65             | 2,50             | 2,36             | 2,30             | 2,27             |
| 12×120                        | 1440                          | 2,94                                                                                                               | 2,64             | 2,48             | 2,33             | 2,28             | 2,25             |
| 12×130                        | 1560                          | 2,92                                                                                                               | 2,62             | 2,46             | 2,30             | 2,25             | 2,22             |
| 12×140                        | 1680                          | 2,90                                                                                                               | 2,58             | 2,43             | 2,28             | 2,23             | 2,20             |
| 12×150                        | 1800                          | 2,87                                                                                                               | 2,55             | 2,40             | 2,27             | 2,21             | 2,17             |
| 12×160                        | 1920                          | 2,85                                                                                                               | 2,52             | 2,36             | 2,24             | 2,18             | 2,15             |
| 12×170                        | 2040                          | 2,83                                                                                                               | 2,50             | 2,35             | 2,22             | 2,16             | 2,13             |
| 12×180                        | 2160                          | 2,80                                                                                                               | 2,48             | 2,34             | 2,20             | 2,15             | 2,12             |
| 12×190                        | 2280                          | 2,78                                                                                                               | 2,46             | 2,32             | 2,19             | 2,14             | 2,10             |
| 12×200                        | 2400                          | 2,77                                                                                                               | 2,45             | 2,30             | 2,18             | 2,13             | 2,09             |
| 14×90                         | 1260                          | 2,88                                                                                                               | 2,53             | 2,38             | 2,26             | 2,18             | 2,15             |
| 14×100                        | 1400                          | 2,85                                                                                                               | 2,51             | 2,36             | 2,21             | 2,15             | 2,12             |
| 14×110                        | 1540                          | 2,83                                                                                                               | 2,49             | 2,34             | 2,18             | 2,12             | 2,09             |
| 14×120                        | 1680                          | 2,80                                                                                                               | 2,47             | 2,32             | 2,16             | 2,10             | 2,07             |
| 14×130                        | 1820                          | 2,78                                                                                                               | 2,45             | 2,29             | 2,13             | 2,08             | 2,05             |
| 14×140                        | 1960                          | 2,76                                                                                                               | 2,44             | 2,28             | 2,12             | 2,06             | 2,04             |
| 14×150                        | 2100                          | 2,74                                                                                                               | 2,42             | 2,26             | 2,11             | 2,05             | 2,03             |
| 14×160                        | 2240                          | 2,72                                                                                                               | 2,40             | 2,24             | 2,09             | 2,03             | 2,00             |
| 14×170                        | 2380                          | 2,72                                                                                                               | 2,38             | 2,23             | 2,08             | 2,02             | 1,99             |
| 14×180                        | 2520                          | 2,70                                                                                                               | 2,37             | 2,22             | 2,06             | 2,01             | 1,98             |
| 14×190                        | 2660                          | 2,68                                                                                                               | 2,36             | 2,21             | 2,05             | 2,00             | 1,96             |
| 14×200                        | 2800                          | 2,66                                                                                                               | 2,35             | 2,19             | 2,04             | 1,99             | 1,95             |

| Размеры пакета лент, мм | Сечение пакета лент, мм | Допустимая плотность тока, А/мм <sup>2</sup> ( $i_{\max} = 90^\circ \text{C}$ ) при различных длинах лент |                  |                  |                  |                  |                  |
|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                         |                         | $l = 900$<br>мм                                                                                           | $l = 1200$<br>мм | $l = 1500$<br>мм | $l = 2000$<br>мм | $l = 2500$<br>мм | $l = 3000$<br>мм |
| 16×90                   | 1440                    | 2,75                                                                                                      | 2,40             | 2,24             | 2,11             | 2,02             | 1,99             |
| 16×100                  | 1600                    | 2,71                                                                                                      | 2,37             | 2,20             | 2,06             | 1,99             | 1,96             |
| 16×110                  | 1760                    | 2,68                                                                                                      | 2,35             | 2,18             | 2,03             | 1,96             | 1,94             |
| 16×120                  | 1920                    | 2,66                                                                                                      | 2,33             | 2,16             | 2,01             | 1,94             | 1,91             |
| 16×130                  | 2080                    | 2,65                                                                                                      | 2,32             | 2,14             | 1,98             | 1,92             | 1,89             |
| 16×140                  | 2240                    | 2,64                                                                                                      | 2,31             | 2,13             | 1,97             | 1,91             | 1,88             |
| 16×150                  | 2400                    | 2,63                                                                                                      | 2,30             | 2,12             | 1,96             | 1,90             | 1,87             |
| 16×160                  | 2560                    | 2,61                                                                                                      | 2,28             | 2,11             | 1,95             | 1,89             | 1,86             |
| 16×170                  | 2720                    | 2,60                                                                                                      | 2,27             | 2,09             | 1,94             | 1,88             | 1,85             |
| 16×180                  | 2880                    | 2,58                                                                                                      | 2,26             | 2,08             | 1,93             | 1,87             | 1,84             |
| 16×190                  | 3040                    | 2,57                                                                                                      | 2,25             | 2,07             | 1,92             | 1,86             | 1,83             |
| 16×200                  | 3200                    | 2,56                                                                                                      | 2,25             | 2,06             | 1,92             | 1,86             | 1,82             |

ТАБЛИЦА 6.10

## РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА В ОТДЕЛЬНЫХ УЧАСТКАХ ТОКОПРОВОДОВ

| Участок токопровода                                | Плотность тока, А/мм <sup>2</sup> | Условия, ограничивающие плотность тока                      |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Медные шины . . . . .                              | 1,4—1,6                           | Тепловой режим проводников                                  |
| Алюминиевые шины . . . . .                         | 0,7—0,8                           | То же                                                       |
| Медные гибкие ленты . . . . .                      | 1,0—1,2                           | » »                                                         |
| Медные кабели (голые) . . . . .                    | 0,8—1,0                           | » »                                                         |
| Водоохлаждаемые трубки жесткого пакета . . . . .   | 2,5—3,5                           | Экономическая плотность тока                                |
| Водоохлаждаемые трубки электродержателя . . . . .  | 3,5—4,5                           | То же                                                       |
| Водоохлаждаемый кабель . . . . .                   | 3,0—3,5                           | » »                                                         |
| Контактные поверхности:<br>медь — медь . . . . .   | 0,2—0,3                           | По условию обеспечения необходимых контактных сопротивлений |
| алюминий — алюминий . . . . .                      | 0,1—0,13                          | То же                                                       |
| медь — уголь . . . . .                             | 1,80—2,6                          | » »                                                         |
| медь — графит . . . . .                            | 2,0—6,0                           | » »                                                         |
| Контакт штека — самоспекающийся электрод . . . . . | $(0,50—2,00) \times 10^{-2}$      | По условию режима работы электрода                          |
| Железо кожуха электрода . . . . .                  | 2,0—2,3                           | То же                                                       |

шинами составляет 700—800 мм, а с алюминиевыми шинами ~ 500 мм.

## 6. Пример расчета активного сопротивления короткой сети печи РКЗ-48ф (Рис. 1.5, а, 1.7, а)

### Трубчатый пакет

Расчет активного сопротивления трубчатого пакета короткой сети производится не по участкам (А—А, В—В, С—С), а по всей длине в связи с тем, что коэффициенты поверхностного эффекта равны для трубок разных участков, а коэффициенты близости мало отличаются друг от друга:

$$n = 8; \quad m = 2; \quad d = 6 \text{ см}; \quad \delta = 1 \text{ см}; \quad \rho = 0,018 \text{ мОм} \cdot \text{м}^2;$$

$$l = 4600 \text{ мм}; \quad t_0 = 20^\circ \text{C}; \quad t_1 = 50^\circ \text{C}.$$

Активное сопротивление трубчатого пакета находим по формуле (VI.7), для чего определяем  $R_0$  по формуле (VI.6)

$$R_0 = 0,018 \frac{4,6}{1570} [1 + 0,0047 (50^\circ - 20^\circ)] = 0,06 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

Коэффициент  $K_n$  находим по формуле (VI.6):

$$k_n = 1 + 3,3 \cdot 10^{-14} \left( \frac{1 \cdot 15,7}{6 \cdot 0,018 \cdot 10^{-4}} \right)^2 = 1 + 0,07 = 1,07.$$

Определяя величины  $\frac{\sigma}{d}$  и  $\frac{l}{d}$  (здесь  $l$  — расстояние между осями трубок) для всех участков, оцениваем значение  $K_6 = 1,06$ .

Следовательно:

$$R_a = 1,07 \cdot 1,06 \cdot 0,06 \cdot 10^{-3} = 0,068 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

По рис. VI.4 определяется коэффициент внешнего поверхностного эффекта:

$$K_{дн} = 1,05.$$

Принимаем коэффициент  $K_{дл} = 1,15$ .

Тогда по формуле (VI.7) активное сопротивление трубчатого пакета с учетом двух последовательных ветвей:

$$R_{ап} = \frac{1,15 \cdot 1,05 \cdot 0,068 \cdot 10^{-3} \cdot 2}{8} = 0,02 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

### Подвижная часть (рис. 1.5, а), сечение

Длина  $l = 252 \text{ см}$ ,  $b = 30 \text{ см}$ ,  $c = 60 \text{ см}$ ,  $t_4 = 40 \text{ см}$ ,  $h = 3 \text{ см}$ .

По формуле (VI.1) находим:

$$R_0 = 0,018 \frac{2,52}{9000} [1 + 0,0047 (50^\circ - 20^\circ)] = 0,0058 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

Для нахождения  $K_6$  и  $K_n$  определяем следующие величины:

$$R_{100} = 0,018 \frac{100}{9000} [1 + 0,0047 (50^\circ - 20^\circ)] = 0,00023 \text{ Ом}$$

$$\sqrt{\frac{f}{R_{100}}} = \sqrt{\frac{50}{0,00023}} = 468,1$$

$\frac{b}{h} = 10$ ; для данного соотношения величин  $b$  и  $h$  принимаем  $K_6 = 1,06$ .

$b : h = 10 : 1$  — коэффициент поверхностного эффекта по кривым рис. VI.1.  $K_n \approx 2,0$ .

Следовательно,  $R_a = 1,06 \cdot 2,0 \cdot 0,0058 \cdot 10^{-3} = 0,012 \cdot 10^{-3}$  Ом.

По рис. VI.5 определяется  $K_{дн} = 1,1$ . Принимаем коэффициент  $K_{дж} = 1,15$ .

Следовательно для двух последовательных ветвей

$$R_{aл} = \frac{1,1 \cdot 1,15 \cdot 0,012 \cdot 10^{-3}}{4} \cdot 2 = 0,0076 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

«Башмак»

Сечение «башмака» заменяется сечением эквивалентного проводника со сторонами  $c$  и  $b$ .

Усредненная длина башмака  $l = 82,5$  см,  $c = 34$  см,  $b = 28$  см,  $d_r = 40$  см.

$$R_0 = 0,018 \frac{0,825}{340 \cdot 280} [1 + 0,0047 (50^\circ - 20^\circ)] = 0,18 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Коэффициент близости принимаем равным  $K_6 = 1,05$ .

Определение коэффициента поверхностного эффекта:

$$R_{100} = 0,018 \frac{100}{95 \cdot 200} [1 + 0,0047 (50^\circ - 20^\circ)] = 0,216 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

$$\sqrt{\frac{f}{R_{100}}} = \sqrt{\frac{50}{0,216 \cdot 10^{-4}}} = 1522.$$

Коэффициент  $K_n$  определяем по рис. VI.1 с помощью аппроксимации представленных на рисунке кривых. Находим  $K_n \approx 8,3$ .

$$R_a = 8,3 \cdot 1,05 \cdot 0,18 \cdot 10^{-6} = 0,0016 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Принимаем  $K_{дн} = 1,05$ ;  $K_{дж} = 1,15$ .

Следовательно для двух последовательных ветвей

$$R_{a6} = \frac{1,15 \cdot 1,05 \cdot 0,0016 \cdot 10^{-3} \cdot 2}{2} = 0,002 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Трубки электрододержателя

$$l = 257,5 \text{ см; } n = 24; \quad D_a = 140; \quad D_p = 400 \text{ см;}$$

$$d = 50 \text{ мм; } \delta = 10 \text{ мм.}$$

По формуле (VI.1) определяем

$$R_0 = 0,018 \frac{257,5 \cdot 10^{-2}}{1256} [1 + 0,0043 (50^\circ - 20^\circ)] = 0,4 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Коэффициент  $K_n$  находим по формуле (VI.6):

$$K_n = 1 + 3,3 \cdot 10^{-14} \left( \frac{1 \cdot 12,56}{6 \cdot 0,018 \cdot 10^{-4}} \right)^2 = 1 + 0,045 = 1,045.$$

$\frac{\delta}{d} = 0,2$ ; кривая для определения  $K_6$  не определена для данного значения  $\frac{\delta}{d}$ , поэтому принимаем  $K_6 \approx 1,06$ .

$$R_a = 1,045 \cdot 1,06 \cdot 0,4 \cdot 10^{-4} = 0,44 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Принимаем коэффициенты  $K_{дн} = 1,2$ ,  $K_{дк} = 1,2$ . Следовательно:

$$R_a = \frac{1,2 \cdot 1,2 \cdot 0,44 \cdot 10^{-4}}{24} = 0,0026 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление проводников короткой сети с учетом ее схемы:

$$R_{к.с} = \frac{0,02 + 0,0076 + 0,002}{3} + 0,0026 = 0,013 \text{ мОм,}$$

что практически совпадает с экспериментальными данными, приведенными в табл. 3.5.

Общее сопротивление контакта щека — электрод на фазу согласно формуле (VI.9):

$$R_{кщ} = \frac{0,25}{12} = 0,021 \text{ мОм.}$$

По формуле (VI.8) проверяем значение переходного сопротивления при усилении 20000 Н

$$R_k = \frac{0,0022}{20000^{0,271}} = 0,15 \text{ мОм}$$

что практически (с учетом загрязнения плиты) мало отличается от принятого значения  $R_k = 0,25 \text{ мОм}$ .

**Электрод**

$$\mu_0 = 60 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}; \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} \text{ Г/см}; \quad l = 1,2 \text{ м.}$$

Активное сопротивление электрода с учетом коэффициента добавочных потерь  $K_d$ , учитывающего неравномерность токораспределения по сечению электродов трехэлектродной печи, равно

$$R = k_d R_a = k_d \frac{\rho_l l}{S}$$

Для нахождения коэффициента  $k_d$  необходимо знать отношение  $D_p/D_a = 400/140 = 2,86$  и рассчитать величину

$$\frac{D_a}{2} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{\rho}} = \frac{D_a}{2} \sqrt{\frac{2\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-9}}{\rho}} = 1,79.$$

Зная эти величины, по кривым рис. VI.2 находим  $k_d = 1,1$ . Следовательно,

$$R_{aa} = 1,1 \frac{60 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2 \cdot 10^2}{15386} = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Общее сопротивление потерь контура  $r_k = R_{кс} + R_{кщ} + R_{aa} = 0,084$ . Расчетное сопротивление потерь совпадает с данными табл. 3.5.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДУГОВЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

### 1. Общие положения

Экспериментально параметры электродуговых печей определяют либо путем измерения их на действующих печах, либо с помощью физического моделирования коротких сетей. Параметры определяются в следующих режимах: короткого замыкания и нормальной эксплуатации.

Первый способ возможно осуществить лишь для сталеплавильных печей, у которых режим погружения электродов в расплавленный металл соответствует опыту короткого замыкания. Руднотермические печи имеют относительно высокие сопротивления расплава. Кроме того, для этих печей визуально невозможно проконтролировать опускание электродов в расплав, так как над расплавом находится большая масса шихтовых материалов. Обе эти причины не позволяют применять способ короткого замыкания для руднотермических печей. Для этих печей возможно определение средних значений электрических параметров за какой-либо период их работы путем обработки данных эксплуатационного контроля, а также определение разовых значений по специально включенным в их измерительные цепи лабораторным приборам. При этом следует иметь в виду, что стрелочные приборы не позволяют точно измерять разовые значения  $r$ .

На рис. VII.1 представлена схема включения измерительных приборов, необходимых для определения параметров электропечного контура (на примере печи РКЗ-48Ф). Приборы контроля включаются во вторичные цепи трансформаторов тока и напряжения, а также непосредственно к электродам печной установки. Токи, протекающие по электродам, контролируются с помощью трансформаторов тока, включенных перед главным трансформатором, имеющим постоянный коэффициент трансформации. Последнее определяет пропорциональность токов стороны НН печного трансформатора и токов, протекающих по короткой сети. Исследования по-

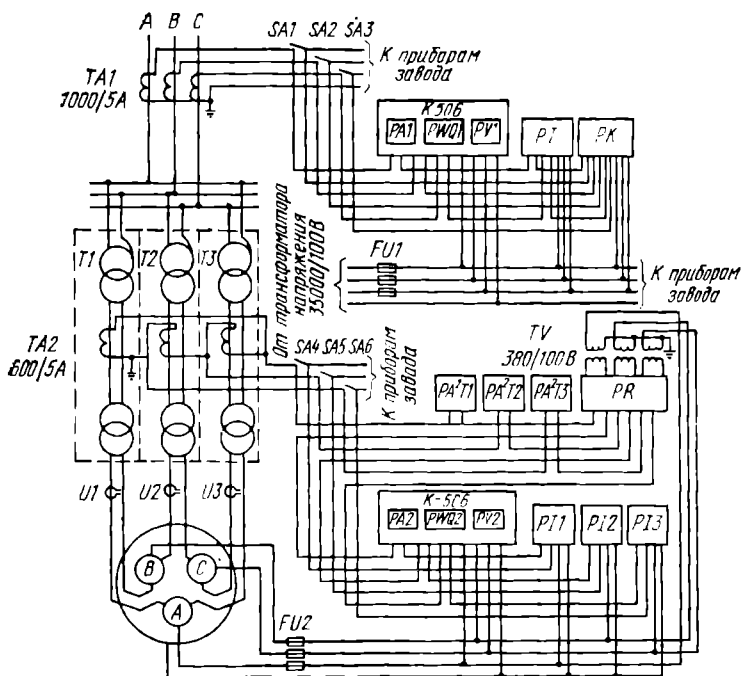


Рис. VII.1. Схема включения измерительных приборов

казали, что влияние тока холостого хода на погрешность измерений токов стороны НН в этом методе не превышает 0,5 % во всех эксплуатационных режимах.

В сталеплавильных печах часто устанавливаются трансформаторы тока непосредственно в фазах короткой сети. В обоих случаях для определения токов в электродах на печах, имеющих схему соединения треугольник с низшей стороны, необходимо соединить вторичные обмотки трансформаторов тока в треугольник (по аналогии с первичной схемой соединения силовых трансформаторов), а амперметры измерения токов в электродах включить в звезду (рис. VII.1).

Схема рис. VII.1 позволяет измерять следующие параметры:

1. Линейные токи с высшей стороны печного трансформатора по амперметру  $PA1$ , токи в электродах печи по амперметру  $PA2$ .

2. Напряжение высшей стороны по вольтметру *PV1*, линейное и фазное напряжение с низшей стороны по прибору *PV2*.

3. Суммарную активную и реактивную мощность с высшей стороны и на ванне печи по ваттварметру *PWQ1* и *PWQ2*.

Указанные приборы класса 0,5 входят в измерительный комплект К-506, при помощи которого путем переключения измерительной цепи удобно производить пофазное измерение параметров руднотермической печи.

4. Среднеквадратичный ток каждого электрода за определенный промежуток времени по электросчетчикам амперкватрчасов  $PA^2T1—PA^2T3$ .

5. Расход активной и реактивной электроэнергии с высшей стороны печного трансформатора по счетчикам *P1* и *PK*, расход активной электроэнергии на ванне печи по фазам по счетчикам *P11—P13* типа Ф-443.

6. Активное сопротивление подэлектродного пространства ванны печи, которое вычисляется по данным измерения мощности и тока или непосредственно измеряется специальным прибором *R*-метром [35].

Схема рис. VII.1 позволяет также производить фазирование цепей тока и напряжения измерительной схемы.

Измерение токов в отдельных проводниках и участках короткой сети производится без разрыва цепи с помощью магнитных поясов, измерение э. д. с. на которых представляет определенные трудности и требует применения специальных схем, описание которых дано ниже. Ряд участков электропечного контура может иметь высокое значение  $\cos \varphi$ , достигающее до величин 0,98—0,99, что создает большие трудности точного определения реактивного сопротивления. К этим участкам в первую очередь относится ванна печи. В то же время участки короткой сети имеют низкие значения  $\cos \varphi$ , достигающие до 0,1, что связано с трудностью измерения активных сопротивлений. Поэтому при определении параметров участков электропечного контура необходимо применение методов, исключающих возникновение погрешностей из-за указанных выше крайне низких и крайне высоких значений  $\cos \varphi$ . Для исключения влияния электромагнитных полей на электроизмерительные приборы необходимо располагать их на расстоянии не менее чем 10—15 м от токоведущих проводников.

Поля токов короткой сети и ванны печи могут наводить на измерительные провода электродвижущую силу



(э. д. с.). Наводимые на измерительные провода цепей напряжений э. д. с. при неудачном расположении которых (параллельно токоведущим участкам) могут достигать величин, соизмеримых с величиной исследуемых падений напряжений. Это вызывает значительную ошибку в определении параметров фаз короткой сети. Вследствие сложной конфигурации короткой сети не представляется возможным расположить измерительные провода цепей напряжением таким образом, чтобы они оказались перпендикулярными всем ее участкам. При определении параметров по участкам измерительные контуры располагаются так, чтобы наводимая э. д. с. была наименьшей, для чего необходимо, чтобы измерительные провода были расположены по возможности перпендикулярно тоководу, а приборы удалены на достаточно большое расстояние от измеряемого участка токовода.

Величина и направление наводимой э. д. с. на измерительный контур учитываются расчетным путем. Таким образом, правильный учет наводок дает возможность внести соответствующую систематическую поправку на результаты измерений параметров коротких сетей. Исходя из вышеизложенного принимается следующая методика исключения систематической погрешности при определении параметров отдельных фаз коротких сетей от наводимых э. д. с.:

1. Измерительный контур располагается таким образом, чтобы наводка была минимальной.

2. При выбранном измерительном контуре определяются параметры коротких сетей.

3. Из измерительных параметров исключаются погрешности от наводимых э. д. с., которые определяются расчетным путем.

Для обеспечения необходимой точности измерения приборы эксплуатационного контроля желательно иметь не ниже класса 1,5. Таким требованиям удовлетворяют щитовые амперметры и вольтметры типа Э-379 и электросчетчики Ленинградского электромеханического завода ЛЭМЗ типа САЗУ-И674Т и СР4-И676Т. Лабораторные измерительные приборы должны иметь класс 0,5 и малое потребление, что особо важно для вольтметров и ваттметров. При определении параметров электропечных установок можно применять трехфазные электронные электросчетчики Ф-441 и Ф-443, имеющие по активной энергии, класс 0,5, а по реактивной — 1,0. Для измере-

ния угла сдвига фаз между электрическими векторами успешно применяется вектометр Ц-50.

Для измерения электрических параметров руднотермических печей могут быть созданы специально разработанные схемы, выполненные на базе измерительных преобразователей тип Е-800, выпускаемых электротехнической промышленностью для комплексной автоматизации объектов электроэнергетики [39].

Преобразователи предназначены для линейного преобразования электрических величин переменного тока в унифицированной выходной сигнал постоянного тока 0—5 мА. Для измерения тока применяется преобразователь типа Е-824, напряжения Е-825, частоты Е-828, активной мощности Е-829, реактивной мощности Е-830. Преобразователи в комплекте с миллиамперметрами типа М1730, М1740 обеспечивают измерение электрических параметров с классом точности 1,0—1,5.

Для реализации расчетного алгоритма используются функциональные измерительные преобразователи постоянного тока и напряжения, которые могут выполнять следующие математические операции: сложение — преобразователь Е-831, умножение Е-817, деление — Е-818, возведение в квадрат — Е-819, извлечение квадратного корня Е-820, логарифмирование — Е-821. В настоящее время разрабатываются и внедряются более совершенные и компактные стандартные электронные аналоговые и цифровые средства представления измерительной информации для решения задач в области автоматизации управления технологическими процессами, измерения большого числа электрических величин, в том числе проведение испытаний и научных экспериментов. В качестве примера может быть использован блок вычислительных операций типа БВО-П. На базе этих средств вычислительной техники могут определяться низкие значения активных и реактивных сопротивлений контура печной установки.

## 2. Определение средних значений электрических параметров действующих печей

При этом методе за исследуемый период работы печи ( $T$ ) определяются следующие электрические параметры:

1. Среднее реактивное сопротивление фазы электропечного контура:

$$x_y = \frac{W_{ry}}{3I_y^2 T} \quad (\text{VII.1})$$

2. Среднее реактивное сопротивление фазы ванны печи

$$x_{\text{в}} = \frac{W_{\text{rv}}}{3I_3^2 T}. \quad (\text{VII.2})$$

3. Среднее реактивное сопротивление фазы короткой сети

$$x_{\text{к.с}} = x_{\text{г}} - x_{\text{в}} - x_{\text{тр}}, \quad (\text{VII.3})$$

где  $x_{\text{тр}}$  — реактивное сопротивление трансформатора.

4. Активное сопротивление, характеризующее потери энергии в трансформаторе, короткой сети и в переходных сопротивлениях контактных щек с электродами:

$$r_{\text{п}} = \frac{W_{\text{ay}} - W_{\text{ав}}}{3I_3^2 T}. \quad (\text{VII.4})$$

5. Среднее активное сопротивление печного контура

$$R = \frac{W_{\text{ay}}}{3I_3^2 T}. \quad (\text{VII.5})$$

6. Среднее полное сопротивление электропечного контура

$$z = \frac{\sqrt{W_{\text{ay}}^2 + W_{\text{ry}}^2}}{3I_3^2 T} \quad (\text{VII.6})$$

7. Средневзвешенный коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{R}{z}.$$

В выражениях (VII.1) и (VII.6) приняты следующие обозначения:  $W_{\text{ay}}$ ;  $W_{\text{ав}}$ ;  $W_{\text{ry}}$ ;  $W_{\text{rv}}$  — значения активной и реактивной энергии, потребляемые за время работы печи  $T$ . Реактивное сопротивление трансформатора  $x_{\text{тр}}$  определяется по его паспортным данным по методике, изложенной в главе третьей.

$I_3$  — среднеквадратичный ток в электроде, который определяется с помощью электросчетчиков амперквадрантчасов [34]. Перед установкой и в процессе эксплуатации производится проверка постоянных электросчетчиков ( $K$ ). Эта постоянная определяется по результатам лабораторной проверки следующим образом:

$$K = \frac{I^2 tN}{3600n}, \quad (\text{VII.7})$$

где  $I$  — ток, устанавливаемый при проверке, А;

$t$  — время за  $n$  оборотов диска, с;  
 $n$  — число оборотов диска за время  $t$ ;  
 $N$  — число оборотов диска за одно деление счетного механизма.

Величина  $K$  определяется для ряда значений тока  $I$ . Зная постоянную электросчетчика, можно определить средний ток в электроде за время  $T$  по формуле

$$I_{\text{э}} = k_{\text{т.т}} k_{\text{п.т}} \sqrt{\frac{KD}{T}}, \quad (\text{VII.8})$$

где  $k_{\text{т.т}}$  — коэффициент трансформации трансформатора тока;

$k_{\text{п.т}}$  — коэффициент трансформации печного трансформатора;

$K$  — постоянная электросчетчика амперквадратчасов,  $\text{А}^2 \cdot \text{ч}$ ;

$D$  — разность показаний электросчетчика за время  $T$ ;

$T$  — время работы печи, ч.

По показаниям трех электросчетчиков амперквадратчасов подсчитывается среднеквадратичный ток электродов печи по формуле

$$I_{\text{э.ср.кв}} = \frac{\sqrt{I_{\text{э1}}^2 + I_{\text{э2}}^2 + I_{\text{э3}}^2}}{3}, \quad (\text{VII.9})$$

где  $I_{\text{э1}}$ ,  $I_{\text{э2}}$ ,  $I_{\text{э3}}$  — токи в электродах.

Для электропечных установок, где нет переключения ступеней напряжения под нагрузкой для увеличения точности измерения электрических параметров можно воспользоваться одним электронным электросчетчиком Ф—440, переделав его в счетчик вольтквадратчасов и подключив его на высокую сторону трансформатора напряжения. Таким образом, за время работы печи  $T$  мы будем иметь среднеквадратичное значение напряжения  $U_{\text{вс}}$ . Зная коэффициент трансформации печного трансформатора, мы получим среднеквадратичное значение напряжения на низшей стороне печного трансформатора  $U_{\text{нп}}$ . Среднеквадратичное значение тока в электродах будет равно:

$$I_{\text{э.ср.кв}} = \frac{\sqrt{W_{\text{ay}}^2 + W_{\text{ay}}^2}}{\sqrt{3} U_{\text{нп}} T}. \quad (\text{VII.10})$$

По формуле (VII.10) значение среднеквадратичного тока можно определить с точностью до 3—5 %.

При использовании изложенного выше метода время  $T$  следует брать не менее чем за несколько суток. В этот период желательно иметь стабильный технологический режим. Число часов работы печи определяется как разность календарного времени периода и числа простоев. Точность определения реактивных сопротивлений лежит в пределах 6—8 %, а точность определения сопротивления активных потерь значительно ниже и не превышает 15 %. Преимуществом настоящего метода является представительность характеристики режима, однако он не позволяет определять сопротивления отдельных участков и фаз установок, поэтому желательно его дополнять специальными исследованиями этих параметров.

### 3. Определение мгновенных значений электрических параметров действующих электродуговых печей

Мгновенные значения реактивных сопротивлений фаз печной установки, ванны, короткой сети и мгновенные значения активных сопротивлений участка потерь энергии определяются аналогично изложенному в предыдущем параграфе. Однако для определения активных и реактивных мощностей и тока используются соответствующие показания ваттметров и амперметров (рис. VII.1).

Для прямоугольных печей и резко асимметричных круглых печей, кроме того, ведется пофазное определение параметров относительно нулевой точки печи, за которую принимается ее подина (под средним электродом). Средние значения параметров устанавливаются по большому числу измерений мгновенных значений.

#### *Сопротивление участков короткой сети*

Для определения активных ( $r$ ) и реактивных ( $x$ ) сопротивлений короткой сети по участкам измеряется падение напряжения ( $U$ ) на участке, сила тока ( $I$ ) и угол между ними ( $\varphi$ ). Расчет осуществляется по следующим формулам:

$$x = \frac{U}{I} \sin \varphi, \quad r = \frac{U}{I} \cos \varphi. \quad (\text{VII.11})$$

Угол  $\varphi$  может измеряться с помощью векторметра Ц-50.

Для более точного определения угла  $\varphi$  на ванне печи

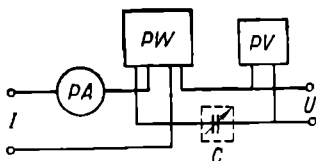
(участок с  $\cos \varphi$ , близким к 1,0), применяют схему, представленную на рис. 2.

Угол между током и напряжением определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = 2\pi fRC \cdot 10^{-6}, \quad (\text{VII.12})$$

где  $f$  — частота, Гц;  $C$  — емкость, мкФ, с помощью которой показания прибора доводятся до нуля;  $R$  — активное сопротивление обмотки напряжения ваттметра, Ом.

Рис. VII.2. Измерительная схема для определения  $\cos \varphi$  на ванне печи



Для участков с низким  $\cos \varphi$  (0,1—0,3) применяется метод измерения параметров с помощью малокосинусного ваттметра типа Д-5020, ( $\cos \varphi_n = 0,1$ ). В этом случае параметры определяются по следующим формулам:

$$z = \frac{U}{I}; \quad r = \frac{P}{I^2}; \quad x = \sqrt{z^2 - r^2}. \quad (\text{VII.13})$$

Если невозможно включение измерительных приборов в цепь трансформаторов тока, определение параметров коротких сетей может быть произведено без разрыва цепи с помощью магнитного пояса. Магнитные пояса просты в изготовлении и могут быть выполнены в лабораторных условиях. На резиновый жгут диаметром 5—6 мм, длиной 2—4 м наматывается на специально приспособленном для этой цели токарном станке медный провод марки ПЭШО диаметром 0,16—0,24 мм в два или четыре слоя. Обмотку можно закрепить клейким медицинским пластырем, а затем изоляционной лентой, а для защиты от теплоизлучения и механических повреждений применяются текстолитовые бусы и резиновые кольца или резиновый шланг. Концы пояса снабжены латунными или текстолитовыми наконечниками с замком, при помощи наконечников они соединяются, в результате чего образуется замкнутый контур вокруг проводника (рис. VII.3, а). Принцип действия магнитного пояса основан на законе полного тока. При охвате магнитным поясом проводника с током  $I$  в поясе наводится электродвижущая сила взаимной индукции, прямо

пропорциональная току  $I$ . Ее действующее значение измеряется в вольтах [21]:

$$E = 8\pi\omega SfI \cdot 10^{-9} = kI. \quad (\text{VII.14})$$

где  $\omega$  — число витков на участке длиной 1 см;  $S$  — сечение витка, см<sup>2</sup>;  $f$  — частота, Гц;  $k$  — постоянная магнитного пояса.

После изготовления пояса градуируют с помощью вольтметра типа Ц-4204, который позволяет определить

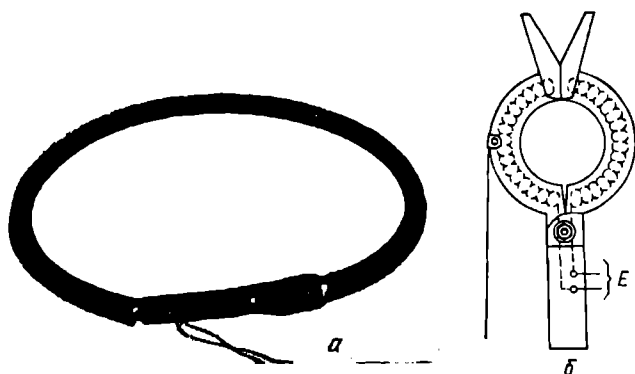


Рис. VII.3. Электромагнитные устройства:  
а — пояса Роговского; б — измерительные клещи

постоянную магнитного пояса. Для измерения тока в трубках электрододержателя изготавливаются электроизмерительные клещи, в которые закладываются четырехслойные пояса (рис. VII.3, б).

В ряде случаев для этой цели используется специальный прибор, состоящий из комплекта поясов и измерительного блока. Измерительный блок состоит из измерительного диодного выпрямителя, подгоночных сопротивлений и микроамперметра, шкала которого отградуирована непосредственно на величины измеряемых токов (рис. VII.4). Подгоночные сопротивления позволяют выравнивать сопротивления всех поясов комплекта и иметь для них одну и ту же шкалу измерительного прибора.

Для измерения мощности может быть применен либо специальный прибор, основанный на принципе эффекта Холла, либо включается обычный ваттметр через измерительный усилитель типа Ф-1510 (рис. VII.5). Если

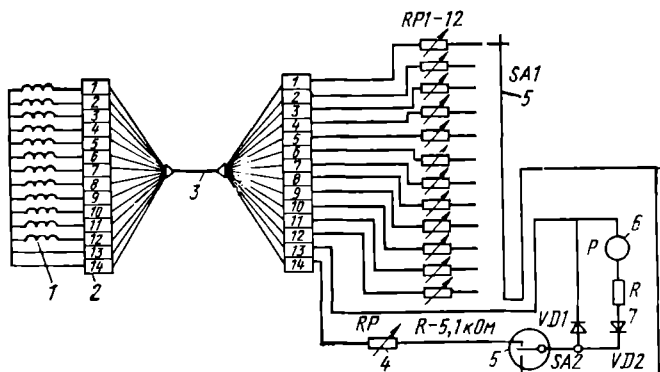


Рис. VII.4. Принципиальная электрическая схема прибора измерения тока в трубках электрододержателя:

1 — пояса Роговского; 2 — клеммник; 3 — кабель; 4 — подгоночное сопротивление; 5 — переключатели; 6 — измерительный прибор; 7 — выпрямитель

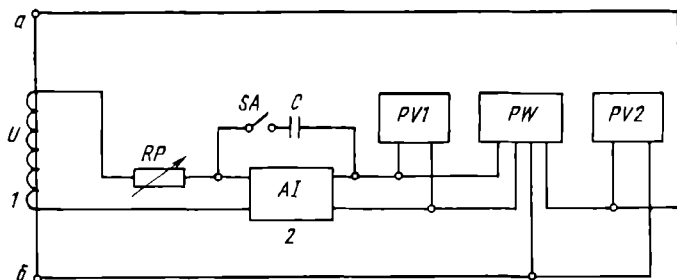


Рис. VII.5. Измерительная схема для определения параметров короткой сети с помощью магнитного пояса:

1 — пояс Роговского; 2 — усилитель интегрирующий

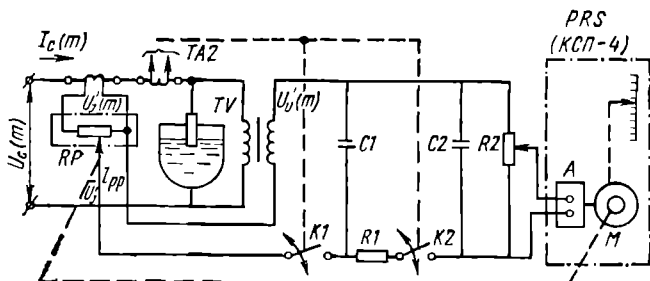


Рис. VII.6. Прибор для измерения активной и реактивной составляющих сопротивления ванны фосфорной электропечи



усилители не имеют интегрирующих цепей, то ваттметры показывают реактивную мощность, а в варианте включения интегрирующей цепи ваттметры покажут активную мощность.

В качестве интегрирующего усилителя можно применить электронный модуль, выполненный на базе операционного усилителя, например, серии 140УД8Б или КМ551УД1А.

Для контроля активного и реактивного сопротивления печной установки по электродам применяют так называемые «R-метр» и «X-метр». Этот прибор состоит из измерительного блока, на который подается ток каждого электрода и фазное напряжение на электроде. При помощи соответствующих преобразователей и усилителя типа УЭ-Ю9 получаем непосредственно величину активного сопротивления по каждому электроду, равную

$$r = \frac{U}{I} \cos \varphi \text{ и величину реактивного сопротивления, равную } x = \frac{U}{I} \sin \varphi \text{ [35].}$$

Сигнал подается на КСП-4 и производится запись активного и реактивного сопротивления по электродам. Схема «R-метра» и «X-метра» приведена на рис. VII.6.

Поправки от наводимых ЭДС на измерительный контур определяются расчетным путем. В связи с тем, что измерение параметров по отдельным участкам затруднено из-за значительных наводимых ЭДС на измерительный контур, расчеты которых очень громоздки, распределение реактивных сопротивлений по участкам короткой сети удобнее производить в сочетании с применением расчетного метода, изложенного в V главе.

#### *Определение переходных сопротивлений контакта щека — электрод*

При измерении переходных сопротивлений контактная щека — электрод ( $r_{к.щ}$ ) измеряется падение напряжения между каждой контактной щекой и электродом ( $U$ ), ток в ней ( $I$ ) и угол между ними ( $\varphi$ ). Переходное сопротивление одной контактной щеки определяется по формуле

$$r_{к.щ} = \frac{U}{I} \cos \varphi. \quad (\text{VII.15})$$

Падение напряжения ( $U$ ) между контактной щекой и электродом измеряется ламповым вольтметром или вольтметром типа Ц4204. Напряжение на них подается

с помощью переносных штанг, расположенных на возможно близком расстоянии друг от друга (бифилярно), что обеспечивает значения наводимых э. д. с. в измерительном контуре, близких нулю.

Измерения производятся в нескольких точках по ширине и высоте плиты. Следует иметь в виду, что при измерении можно провести только для открытых печей, а для закрытых их приходится производить на специальных испытательных стендах, моделирующих условия работы плиты.

Переходное сопротивление всех контактных щек на один электрод определяется по формуле

$$r_{\text{ср.к.щ}} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{\text{ик.щ}} I_{\text{ик.щ}}^2}{I_{\Sigma}^2} \quad (\text{VII.16})$$

### *Сопротивление электрода*

При определении активного сопротивления потерь в электродах измеряется падение напряжения ( $U$ ) на участке электрода длиной 20—30 см, ток ( $I$ ) и угол между ними ( $\varphi$ ). По замеренным параметрам подсчитывается среднее удельное сопротивление ( $\rho$ ) электрода на участке потерь энергии.

## **4. Определение электрических параметров с помощью опыта короткого замыкания**

Большинство исследователей при определении реактивного и активного сопротивлений коротких сетей действующих сталеплавильных печей применяют метод опыта короткого замыкания. Это позволяет с точностью  $\pm 5\%$  определить реактивное и активное сопротивление участков потерь энергии, определяющих электрические характеристики печи при работе на соответствующих рабочих напряжениях. Для проведения опыта короткого замыкания собирается измерительная схема, показанная на рис. VII.1.

Опыт короткого замыкания проводится в конце периода плавления, как правило, при выплавке сталей, для которых дополнительное содержание углерода (0,01—0,02 %) не опасно.

Последовательность проведения опыта короткого замыкания (к. з.) следующая. Токовые цепи измерительных приборов закорачиваются, чтобы не повредить их

механическую систему при эксплуатационных токах к.з. В конце периода расплавления поднимают электроды до обрыва дуги, отключают высоковольтный выключатель, деблокируют оперативную цепь реле защиты от перегрузки и расшунтируют токовые цепи измерительных приборов. После этого устанавливают ступень трансформатора с низшим пределом напряжения, включают высоковольтный выключатель (и дроссель, если он имеется) и с помощью автоматической системы управления набирают рабочий ток. Затем переводят управление электродов с автоматического на ручное и опускают их поочередно до тех пор, пока не прекратится рост тока. Убедиться в этом можно, поочередно опуская электроды на 10—20 мм и наблюдая за постоянством показания амперметров.

При проведении опыта фиксируются токи в электродах  $I_{\Sigma 1}$ ,  $I_{\Sigma 2}$ ,  $I_{\Sigma 3}$ , активная мощность  $P_{к.з}$  и реактивная мощность  $Q_y$ . Параметры цепи определяются из выражений

$$x_y = \frac{Q_y}{I_{\Sigma 1}^2 + I_{\Sigma 2}^2 + I_{\Sigma 3}^2}, \quad (\text{VII.17})$$

$$r_n = \frac{P_{к.з} - P_{х.х}}{I_{\Sigma 1}^2 + I_{\Sigma 2}^2 + I_{\Sigma 3}^2}, \quad (\text{VII.18})$$

$P_{х.х}$  — потери холостого хода трансформатора.

Следует иметь в виду, что величина измеренного реактивного и активного сопротивлений ниже имеющих место в эксплуатационных условиях вследствие наличия высших гармонических составляющих в рабочих токах сталеплавильных печей.

Реактивные и активные сопротивления изменяются в зависимости от тока следующим образом [11]:

$$x = x_k \left( \frac{I}{I_k} \right)^{-k_1}, \quad (\text{VII.19})$$

$$r = r_k \left( \frac{I}{I_k} \right)^{-k_2}. \quad (\text{VII.20})$$

Величины  $k_1$  и  $k_2$  могут быть найдены из выражений

$$k_1 = \frac{\lg \frac{x}{x_k}}{\lg \frac{I}{I_k}}, \quad \left. \vphantom{\frac{\lg \frac{x}{x_k}}{\lg \frac{I}{I_k}}} \right\}$$

$$k_2 = \frac{\lg \frac{r}{r_k}}{\lg \frac{l}{l_k}} \quad \left. \vphantom{\frac{\lg \frac{r}{r_k}}{\lg \frac{l}{l_k}}} \right\} \quad (\text{VII.21})$$

Так, для 50-т сталеплавильных печей  $k_1=1,2$ . Для каждого типа печей величины  $k_1$  и  $k_2$  могут быть установлены путем сопоставления эксплуатационных данных и результатов опыта короткого замыкания.

## 5. Определение электрических параметров коротких сетей с помощью физического моделирования

Наиболее точным методом определения электрических параметров вновь разрабатываемых печных установок является физическое моделирование их коротких сетей. При использовании этого метода создается геометрическая модель короткой сети проектируемой печной установки, на которой экспериментально определяются реактивные и активные сопротивления ее участков. В процессе моделирования различных конструкций выбирается оптимальный вариант

При моделировании коротких сетей соблюдается подобие электромагнитных полей, обеспечивающее подобие электрических явлений в сходственных точках.

Соотношение между параметрами модели и оригинала определяется критерием подобия [36]

$$\Pi_1 = \omega j \mu l^2 = \text{idem}, \quad (\text{VII.22})$$

где  $\omega$  — частота;  $j$  — удельная проводимость материала;  $\mu$  — магнитная проницаемость среды;  $l$  — характерный геометрический размер.

В дальнейшем индекс «м» будет относиться к соответствующим величинам модели, а индекс «о» — к величинам оригинала. Моделирование, как правило, производится с использованием тех же материалов и той среды, что и у оригинала, поэтому масштабы  $m_j = m_\mu = 1$ . Масштаб линейных размеров выбирается в соответствии с частотой источника питания моделирующего стенда:

$$m_l = \frac{l_o}{l_m} = \sqrt{\frac{f_m}{f_o}}, \quad m_t = \sqrt{\frac{1}{m_f}}, \quad (\text{VII.23})$$

где  $l_o$ ,  $l_m$  — соответственно геометрические размеры и частоты оригинала и модели.

Масштабы остальных параметров определяются следующим образом:

активные, реактивные и полные сопротивления  $1/m_i$ ;

индуктивности  $m_i$ ;

падение напряжения  $m_i/m_i$ ;

активная, реактивная и полная мощность  $m_i^2/m_i$ ;

коэффициент мощности 1;

коэффициент полезного действия 1.

Источники питания моделей, как правило, трехфазные. В качестве последних применяются либо вращающиеся преобразователи (например, типа ГТ-500-П мощностью 50 кВт), дающие ток частотой 400—500 Гц, либо радиоусилители типа УПВ-5-36 с фазовращательными цепочками, обеспечивающие частоту в широком диапазоне от 50—10 000 Гц. Для обеспечений точности геометрического подобия и точности измерений масштаб линейных размеров выбирают в пределах 3,16—7,0, соответственно частоты лежат в диапазоне 500—2500 Гц, а токи, протекающие по моделям, должны составлять 500—1000 А. Поэтому между моделью и источником питания устанавливается понижающий трансформатор, имеющий первичное напряжение 380/220 В, а вторичное 10—20 В. В качестве таковых можно использовать трансформаторы контактной сварки, например, типа ТКП-75 или ТКП-150. При отсутствии трехфазного источника питания могут использоваться однофазные преобразователи, однако этот метод дает удовлетворительную точность лишь для симметричных схем короткой сети.

Принципы измерения параметров на модели и оригинале аналогичны. К особенностям измерений на моделях относится необходимость выбора приборов, обеспечивающих достаточную точность при токах повышенной частоты.

Каждая фаза модели представляет собой последовательное соединение сопротивлений питающих шин ( $z_{пш}$ ), короткой сети  $z_{кс}$ , электродов ( $z_{эл}$ ) и закорачивающих шин ( $z_{зш}$ ).

Измерение тока производится с помощью трансформаторов тока типа УТТ-6М2 класса точности 0,2 ( $I_n = 2000$  А) или с помощью катушек высоковольтных трансформаторов типа ТШВ-15Р/0,5  $I_n = 6000$  А класса точности 0,5 ( $I_n = 5000$  А). Номинальная частота обоих типов трансформаторов тока — 50 Гц. Испытания этих трансформаторов показали, что погрешности при изме-

решии тока частотой 500—2500 Гц не выходят из класса точности 0,5—1,0.

Измерения тока вторичной стороны трансформаторов тока производятся электромагнитными амперметрами типа Э-526 класса точности 0,5, предназначенными для работы в расширенной области частот 45—1500 Гц.

Падение напряжения на участках фаз моделей составляет величину порядка 0,2—2,5 В и измеряется вольтметром типа Э-531, имеющим класс точности 0,5 в диапазоне частот 45— $3 \cdot 10^3$  Гц.

Величина активной мощности измеряется электродинамическим ваттметром типа Д-5020 класса точности 0,5 с номинальным коэффициентом мощности  $\cos \varphi_n = 0,1$ . Ваттметр предназначен для измерения при частоте 45÷400 Гц.

Проверка работы прибора при частоте 500 Гц показала, что его приведенная погрешность практически не превосходит 0,5 %, а при более высоких частотах (до 2500 Гц) лежит в пределах 2,5 %.

По измеренным величинам фазного тока ( $I_\phi$ ) падения напряжения на фазе модели короткой сети ( $U_{\phi.к.с}$ ) и активной мощности фазы модели ( $P_{\phi.к.с}$ ) рассчитываются для каждой фазы короткой сети:

общее сопротивление

$$z_{\phi.к.с} = \frac{U_{\phi.к.с}}{I_\phi}, \quad (\text{VII.24})$$

активное сопротивление

$$r_{\phi.к.с} = P_{\phi.к.с} / I_\phi^2, \quad (\text{VII.25})$$

реактивное сопротивление

$$x_{\phi.к.с} = \sqrt{z_{\phi.к.с}^2 - r_{\phi.к.с}^2}, \quad (\text{VII.26})$$

коэффициент мощности

$$\cos \varphi = r_{\phi.к.с} / z_{\phi.к.с}. \quad (\text{VII.27})$$

Погрешности измерительных приборов вызывают ошибки в определении  $r_{\phi.к.с}$  и  $x_{\phi.к.с}$ , которые, как показали расчеты, не превосходят  $\pm 5$ —8 %.

Для уточнения реактивного сопротивления фаз модели дополнительно к вышеназванным измерениям определяется угол сдвига фаз между током и падением напряжения. При этом реактивное сопротивление фазы определяется как

$$x_{\phi.к.с} = z_{\phi.к.с} \sin \varphi. \quad (\text{VII.28})$$

Разность фаз  $\varphi$  определяется с помощью электронного осциллографа методом фигур Лиссажу. На вертикальный вход осциллографа подается падение напряжения с безиндукционного сопротивления 0,2 Ом, включенного во вторичную цепь трансформатора тока, а на горизонтальный вход подается падение напряжения фазы модели короткой сети.

Образующаяся на экране осциллографа фигура Лиссажу первого порядка представляет собой эллипс (рис. VII.7), на котором измеряются оси  $a$  и  $b$ , а также стороны описанного прямоугольника  $x$  и  $y$ . Тогда

$$\varphi = \arcsin \frac{ab}{xy}. \quad (\text{VII.29})$$

Величины  $x$  и  $y$  поддерживаются равными, а оси подбираются таким образом, чтобы стороны описанного квадрата были достаточно большими (диаметр трубки осциллографа 120 мм). В ряде случаев определяется дополнительный угол путем подачи на пластины осциллографа э.д.с. магнитного пояса и падения напряжения. При этом эллипс сводится в прямую с помощью магазина емкостей, включаемого параллельно зажимам, к которым подключен пояс, и с помощью магазина сопротивлений, включаемого последовательно с цепью пояса. Угол  $\varphi$  определяется по формуле

$$\varphi = \arctg \omega RC \cdot 10^{-6}, \quad (\text{VII.30})$$

где  $\omega$  — частота;  $C$  — емкость магазина, мкФ;  $R$  — суммарное сопротивление пояса и дополнительного сопротивления магазина.

Когда угол  $\varphi$  находится в 3-м квадранте вместо емкости применяют магазин индуктивностей. Это приходится делать, когда имеет место отрицательное сопротивление переноса мощности.

Расчеты показали, что погрешность определения реактивного сопротивления фазы и участков модели при точности измерения угла сдвига фаз  $\pm 1,5^\circ$  не будет превосходить  $\pm 5\%$ .

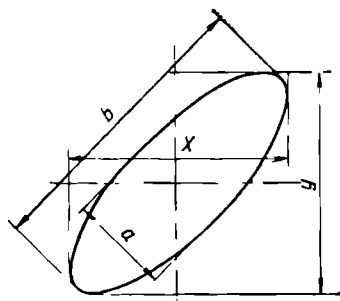


Рис. VII.7. Фигура Лиссажу для определения  $\varphi$  в формуле (VII.30)

Такая точность определения параметров короткой сети является достаточной, так как позволяет правильно решать все инженерные задачи, которые возникают при проектировании коротких сетей большой мощности. Кроме ошибок, связанных с погрешностями самих приборов, могут возникнуть погрешности, связанные с величиной сопротивления измерительных проводов и их расположением в пространстве. Исключение систематической погрешности при определении параметров отдельных фаз короткой сети от наводимых э. д. с. производится следующим образом:

1. Измерительный контур располагается таким образом, чтобы наводка была минимальной (выбор такого контура легко определяется на основании логических рассуждений, а иногда сравнением расчета наводок нескольких вариантов измерительных контуров).

2. При выбранном измерительном контуре определяются параметры короткой сети.

3. Из измеряемых параметров исключаются погрешности от наводимых э. д. с., которые определяются расчетным путем.

Следует отметить, что если удачно расположить измерительный контур, то в большинстве случаев величина этой погрешности оказывается незначительной. Точность расчета наводимых э. д. с. можно анализировать путем сравнения параметров фаз модели короткой сети, определяемых с учетом поправок для нескольких измерительных контуров. Расчеты показывают, что величина поправок от э. д. с., наводимых на измерительные провода, для варианта с минимальной наводкой составляет 2—3 % от значения определяемых параметров модели. Это свидетельствует о том, что экспериментальная проверка расчетных величин наводимых э. д. с. важна лишь для того, чтобы убедиться в правильности порядка этих величин.

Принятая методика определения параметров модели дает основание считать, что ошибка в их определении не превосходит 5—6 %, что соответствует требованиям инженерных расчетов параметров коротких сетей.



## ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОПЕЧНОГО КОНТУРА С УСТАНОВКАМИ ИСКУССТВЕННОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

### 1. Общие положения

По режиму потребления реактивной мощности агрегаты, рассматриваемые в настоящей работе, можно разделить на следующие две группы: а) руднотермические печи большой мощности, б) сталеплавильные печи.

#### *Руднотермические печи*

Технология процесса обеспечивает на этих печах достаточную стабильность потребления реактивной мощности и отсутствие резких бросков ее величины. Изменение электрического режима на этих печах, как правило, может иметь место только периодически, в связи с изменением качества шихтовых материалов, отказом работы отдельных узлов или в связи с необходимостью диспетчерского регулирования мощности.

В соответствии с требованиями технологии увеличение мощности руднотермических электропечей сопровождается значительным повышением величин рабочих токов в электродах при сравнительно медленном росте полезных напряжений. В этом случае имеет место резкое возрастание индуктивной составляющей падения напряжения в электрической цепи печной установки, а следовательно, и понижение ее коэффициента мощности.

Мощность создаваемых в настоящее время печей достигла уже такого предела, что величина индуктивного падения напряжения становится недопустимо большой, а их естественный коэффициент мощности не превосходит величины 0,6—0,7 (см. III главу настоящего справочника). Для преодоления барьера, стоящего на пути увеличения мощности руднотермических печей, необходимо создать искусственную компенсацию реактивной мощности.

Для решения этой проблемы в последнее время на руднотермических электропечных агрегатах применяются установки продольно-емкостной компенсации реак-

тивной мощности (УПК), обеспечивающие автоматическую компенсацию индуктивного падения напряжения.

Проведенные в предшествующих главах анализ и обзор параметров действующих печей показали, что применение наилучших схем и конструкций коротких сетей не позволяют получить значения реактивных сопротивлений менее предельных величин. Это объясняется в первую очередь тем, что увеличение числа проводников в фазе короткой сети сверх определенного значения не приводит к существенному уменьшению реактивного сопротивления печной установки. В то же время значительную часть реактивного сопротивления (40—60 %) (табл. 4.4) составляют сопротивления электрододержателей, электродов и ванны печи, которые без нарушения ведения технологического процесса изменить нельзя.

Невозможность снизить реактивное сопротивление печи печного контура ( $x_y$ ) приводит к уменьшению естественного коэффициента мощности руднотермических печей по мере увеличения их мощности (табл. 4.3) и вызывает необходимость применения установок искусственной компенсации реактивной мощности.

Последнее подтверждается анализом следующих выражений, определяющих  $\cos \varphi$  руднотермических печей:

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - y^2 x_y^2}, \quad (\text{VIII.1})$$

$$y = \frac{I_3}{U_\Phi} = \sqrt{\left[ \frac{c^2}{2(1-n)x_y^2 S_\Phi^{(1-2n)}} + \frac{r_y}{x_y^2} \right]^2 + \frac{1}{(1-n)x_y^2} - \left[ \frac{c^2}{2(1-n)x_y^2 S_\Phi^{(1-2n)}} + \frac{r_y}{x_y^2} \right]}, \quad (\text{VIII.2})$$

где  $c$  и  $n$  — постоянные, характеризующие связь между полезным напряжением ( $U_{\text{пол}}$ ) и полезной мощностью печи ( $P_{\text{пол}}$ ) в выражении

$$U_{\text{пол}} = c P_{\text{пол}}^n \quad (\text{VIII.3})$$

(величины  $c$  и  $n$  для каждого вида технологического процесса определяются методом статистической обработки данных эксплуатации действующих руднотермических печей);  $I_3$ ,  $U_\Phi$ ,  $S_\Phi$  — соответственно ток в электроде, фазное напряжение и фазная мощность печи;  $x_y$ ,  $r_y$  — реактивное и активное сопротивление потерь одной фазы печи.

В табл. 8.1 приведены значения коэффициентов  $c$  и  $n$  для руднотермических печей различных технологичес-

| Наименование продукта        | $\cos \varphi$ , В/Вт <sup>0,33</sup> | $\eta$ |
|------------------------------|---------------------------------------|--------|
| Рафинированный феррохром     | 1,70—1,80                             | 0,33   |
| Ферросилиций Si75            | 0,46—0,48                             | 0,33   |
| Ферросиликохром              | 0,48—0,51                             | 0,33   |
| Феррохром                    | 0,52—0,56                             | 0,33   |
| Силикокальций                | 0,36—0,40                             | 0,33   |
| Ферромарганец                | 0,90—0,97                             | 0,28   |
| Силикоалюминий               | 1,22—1,30                             | 0,25   |
| Фосфор желтый                | 0,90—1,10                             | 0,33   |
| Карбид кальция               | 0,45—0,55                             | 0,33   |
| Белый электрокорунд          | 1,20—1,30                             | 0,33   |
| Нормальный электрокорунд     | 0,75—0,85                             | 0,33   |
| Хромотитанстый электрокорунд | 1,10—1,20                             | 0,33   |
| Циркониевый электрокорунд    | 0,65—0,75                             | 0,33   |

ких процессов, границы изменения  $\cos \varphi$  в различных электротехнологических режимах. Вместе с тем электротехнологические режимы бывают многогранны, что в отдельных случаях величина  $\cos \varphi$  может выйти за пределы тех значений, которые указаны в таблице.

Крупные печные установки, как правило, оборудуются печными трансформаторами, которые имеют напряжение первичной стороны 110—220 кВ (реже 35 кВ) и питаются от районных подстанций энергосистемы, потребляя сотни миллионов кВт·ч/год. Для таких потребителей оптимальное (с экономической точки зрения) значение  $\cos \varphi$ , выше которого нецелесообразно применение установок искусственной компенсации реактивной мощности, лежит в пределах 0,90—0,98 и будет определяться конкретными условиями электроснабжения. Этим значениям коэффициента мощности соответствуют предельные мощности печей  $S_{\text{пк}}$ , не требующие компенсации реактивной мощности. ПУЭУ [10] требуют для электротермических установок повышения  $\cos \varphi$  с помощью установок индивидуальной компенсации до величины 0,98, что привело к резкому снижению величины  $S_{\text{пк}}$ . Практически все вновь создаваемые руднотермические печи мощностью более 8—10 МВ·А требуют искусственной компенсации реактивной мощности. Следовательно, заводы для производства таких продуктов, как карбид кальция, ферросплавы, силумин и т. д. с мощными руд-

нотермическими печами (табл. 3.8) должны оборудоваться установками искусственной компенсации реактивной мощности. Эти установки должны обеспечить оптимальный баланс потребления и выработки реактивной энергии. Для поддержания требуемого технологического процесса характерной величиной будет такое значение коэффициента мощности  $\cos \varphi$ , которое соответствует максимуму полезной мощности ( $P_{\text{полмакс}}$ ) на кривой электрической характеристики, представляющей зависимость полезной мощности от тока в электродах. Эта величина, как известно, определяется соотношением активных и реактивных сопротивлений печной установки:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{r_y^2}{r_y^2 + x_y^2}} \quad (\text{VIII.4})$$

Для мощных руднотермических печей  $\cos \varphi_{P_{\text{полмакс}}}$  будет равен 0,75—0,78. При работе печей с коэффициентом мощности, меньшим величины  $\cos \varphi_{P_{\text{полмакс}}}$  уменьшение тока печи, вызванное подъемом электродов или повышением сопротивления подэлектродного пространства, вызовет увеличение полезной мощности печи, а увеличение тока, наоборот, будет сопровождаться уменьшением полезной мощности. Это несколько затрудняет ведение процесса, поэтому, как правило, предпочитают строить печи, работающие на восходящей ветви электрической характеристики. Следует иметь в виду, что коэффициент мощности должен быть не ниже  $\cos \varphi_{P_{\text{полмакс}}}$  на всех рабочих ступенях печного трансформатора. Как показал анализ работы действующих руднотермических печей, последнее условие выполняется в случае, если его среднее значение будет не менее 0,78—0,82. Следовательно, предельные по электрическим характеристикам мощности руднотермических печей  $S_{\text{п}}$  должны соответствовать этому значению коэффициента мощности.

Таким образом, современные руднотермические электропечные установки мощностью выше величины  $S_{\text{п}}$  могут оборудоваться УПК. В диапазоне мощностей от  $S_{\text{пт}}$  до  $S_{\text{п}}$  компенсация реактивной мощности руднотермических печей может осуществляться на сборных шинах главной понизительной подстанции.

В последнее время в связи с развитием качества автоматического управления печами за рубежом нашла применение поперечная компенсация реактивной мощности в цепях среднего напряжения трансформатора.

Мощность действующих сталеплавильных дуговых печей лежит в широких пределах (0,50—100 МВ·А). В настоящее время ставится задача доведения мощности печи до 150—200 МВ·А. Дуговые сталеплавильные печи представляют собой печи прямого нагрева, в которых дуги горят между электродом и расплавленным металлом. Сталеплавильные печи в отличие от руднотермических печей работают не непрерывно, а циклично. Каждый цикл работы печи включает в себя период расплавления, окисления и доводки (рафинирования). Наибольшую мощность потребляет печь в период расплавления. В этот период потребляется 60—80 % электроэнергии, использованной на плавку. Режим работы в этот период характеризуется наличием частых эксплуатационных коротких замыканий, существенной величиной высших гармонических составляющих тока, низким значением коэффициента мощности и, следовательно, наибольшим потреблением реактивной мощности.

В табл. 8.2 приведены данные потребления активной и реактивной мощности печи трансформатором 12,3 МВ·А. Если средний коэффициент мощности за период расплавления такой печи составляет 0,76, то в период рафинирования он повышается до 0,85—0,88. Потребление реактивной мощности сталеплавильными печами происходит весьма неравномерно. Резкие всплески реактивной нагрузки происходят в моменты эксплуатационных коротких замыканий, вызывая значительные спады уровня напряжения в питающей сети. Кроме того, возможные периодические нагрузки с низшей стороны (с частотой 3—4 Гц), которые также оказывают отрицательное влияние на питающую сеть энергосистемы. Колебания напряжения в питающей сети более чем на 0,5—1,0 % недопустимы, так как это отрицательно сказывается на других потребителях, подключенных к данному узлу энергосистемы. Поэтому при решении вопроса компенсации реактивной мощности сталеплавильных печей одновременно приходится решать проблему ликвидации этих колебаний. Величина коэффициента мощности дуговых сталеплавильных печей, так же как и руднотермических, зависит от значения реактивного сопротивления печного контура. Следует отметить, что для печей малой мощности реактивное сопротивление искусственно увеличивают, включая дроссели с высшей стороны трансформатора с тем, чтобы уменьшить отношение то-

ТАБЛИЦА 8.2

ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧЬЮ С ТРАНСФОРМАТОРОМ 12,3 МВ·А

| Периоды плавки | Напряжение на выводах трансформатора, В | Время работы, ч | Расход активной энергии, кВт·ч | Расход реактивной энергии, квар·ч | Средне-квadraticный ток, кА | Средняя мощность |               |                  | Коэффициент мощности |
|----------------|-----------------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------|---------------|------------------|----------------------|
|                |                                         |                 |                                |                                   |                             | полная, МВ·А     | активная, МВт | реактивная, Мвар |                      |
| Расплавление   | 297                                     | 2,660           | 25 250                         | 22 600                            | 23,26                       | 12,75            | 9,50          | 8,50             | 0,745                |
|                | 262                                     | 0,508           | 3 440                          | 2 880                             | 18,25                       | 8,84             | 6,77          | 5,68             | 0,766                |
| За весь период | —                                       | 3,168           | 28 690                         | 25 480                            | 22,60                       | 12,12            | 9,05          | 8,05             | 0,746                |
| Окисление      | 262                                     | 0,400           | 2 710                          | 2 270                             | 18,85                       | 8,83             | 6,77          | 5,68             | 0,766                |
|                | 236                                     | 0,550           | 3 180                          | 2 730                             | 17,80                       | 7,62             | 5,78          | 4,97             | 0,753                |
| За весь период | —                                       | 0,950           | 5 890                          | 5 000                             | 18,20                       | 8,12             | 6,20          | 5,27             | 0,762                |
| Рафинирование  | 208                                     | 0,417           | 2 060                          | 1 850                             | 18,35                       | 6,63             | 4,93          | 4,43             | 0,743                |
|                | 185                                     | 0,310           | 1 140                          | 774                               | 14,35                       | 4,44             | 3,69          | 2,50             | 0,820                |
|                | 175                                     | 0,500           | 1 390                          | 862                               | 12,70                       | 3,27             | 2,78          | 1,72             | 0,856                |
|                | 152                                     | 0,505           | 1 330                          | 700                               | 10,45                       | 2,97             | 2,67          | 1,39             | 0,884                |
|                | 136                                     | 0,482           | 958                            | 542                               | 8,65                        | 2,28             | 1,99          | 1,12             | 0,871                |
| За весь период | —                                       | 2,214           | 6 878                          | 4 728                             | 12,50                       | 3,77             | 3,10          | 2,14             | 0,823                |
| Вся плавка     | —                                       | 6,332           | 41 458                         | 35 208                            | 18,70                       | 8,60             | 6,54          | 5,57             | 0,761                |

ка короткого замыкания  $I_{к.з}$  к номинальному току  $I_n$  до величины  $k=2,5 \div 3,5$  ( $k=I_{к.з}/I_n \approx 1/\sin \varphi$ ). Вследствие этого коэффициент мощности этих печей не превышает 0,91—0,92, а с учетом несинусоидальности кривой тока величина  $\cos \varphi$  даже у печей малой мощности не выше 0,88—0,90. По мере увеличения мощности этих печей реактивность достигает таких значений, при которых отпадает необходимость включения дросселя. Средняя величина реактивного сопротивления мощных сталеплавильных печей, как было показано в III главе, при оптимальных схемах коротких замыканий сетей составляет 2,8—3,4 мОм, и их средний коэффициент мощности за плавку равен 0,75—0,80. Как следует из анализа параметров мощных сталеплавильных печей, их естественный коэффициент мощности лежит значительно ниже значения оптимального коэффициента мощности, и поэтому заводам, оборудованным этими печами, требуются установки искусственной компенсации реактивной мощности.

За рубежом и в СССР для сталеплавильных и других печей с аналогичным режимом получили распространение схемы поперечной компенсации реактивной мощности, предусматривающие подключение конденсаторов к промежуточным обмоткам печных трансформаторов [6]. Эти схемы включения конденсаторов осуществляются на сталеплавильных печах с целью обеспечения постоянства коэффициента мощности в различные периоды работы печи. Уменьшение выработки реактивной мощности конденсаторами по мере снижения напряжения со стороны низшего напряжения печного трансформатора на сталеплавильных печах должно соответствовать уменьшению потребляемой ими при этом активной и реактивной мощности.

Кроме того, включение конденсаторов или печи с конденсаторами может происходить на ступени низшего напряжения, что позволит исключить коммутационные перенапряжения. Конденсаторы включаются в цепи с напряжением 0,4 кВ или 6—10 кВ, а не 35—110 кВ, что обеспечивает облегчение конструкции конденсаторной батареи.

При выборе параметров конденсаторной батареи поперечной компенсации сталеплавильных печей следует иметь в виду, что в кривой тока может быть до 10—15 % третьей гармонической составляющей, что усложняет условия работы этих конденсаторных батарей.

При решении вопроса компенсации реактивной мощ-

ности сталеплавильных печей, подключаемых к точкам энергосистем, в которых мощность короткого замыкания меньше 80—100-кратного значения мощности отдельного агрегата, одновременно с проблемой повышения  $\cos \phi$  приходится решать вопросы ликвидации недопустимых колебаний напряжения. Как известно, обычные схемы поперечной компенсации не решают последнего вопроса. Поперечная емкостная компенсация повышает общий уровень напряжения, а амплитуда колебаний напряжений при этом не изменяется. Типовые синхронные компенсаторы по своему быстрдействию также не удовлетворяют этим требованиям. В Швеции решение обеих проблем искали в применении синхронных компенсаторов с тиристорным возбуждением. Так, в цехе с двумя 100-т печами мощностью 25 МВ·А каждая устанавливается синхронный компенсатор мощностью 42,5 МВ·А с тиристорным возбуждением.

В последнее время в литературе уделяется большое внимание статическим источникам реактивной мощности, применение которых является весьма перспективным методом повышения  $\cos \phi$  и ликвидации колебания напряжения потребляемой с резкими бросками реактивной мощности, какими являются сталеплавильные печи.

Управляемые конденсаторные батареи ДСП должны обеспечивать изменение реактивной мощности в пределах 200—280 Мвар/с, что составляет 2,5—3,0-х кратную величину номинального значения реактивной мощности печи в секунду [37].

В настоящее время применяют следующие способы регулирования:

а) ступенчатое регулирование путем включения или отключения отдельных секций конденсаторной батареи или же изменение ее соединений [37];

б) плавное регулирование с помощью тиристорных ключей;

в) регулирование с помощью изменения индуктивности, включенной параллельно или последовательно с емкостью.

Предприятия Минэлектротехпрома СССР освоили производство электрооборудования статических компенсаторов дуговых сталеплавильных печей [38]. В его состав входят тиристорно-реакторные группы (ТРГ) на напряжение 35 или 38,5 кВ мощностью 160 Мвар и фильтрокомпенсирующие цепи (ФКЦ), представляющие фильтр В—С. Эти статические компенсаторы являются элемен-



тами электроснабжения и представляют собой сложные агрегаты, являющиеся установками искусственной компенсации реактивной мощности группы сталеплавильных печей всего предприятия.

## 2. Влияние поперечной компенсации на режим работы токоприемников

Применение конденсаторов для повышения коэффициента мощности основано на явлениях в цепи переменного тока при параллельном (поперечном) соединении индуктивного и емкостного элементов (рис. VIII.1). В цепи с индуктивностью ток отстает от напряжения на зажимах (разность фаз  $\varphi > 0$ ), а в цепи с емкостью ток опережает напряжение ( $\varphi < 0$ ). При параллельном соединении индуктивности и емкости ток  $I_2$  в неразветвленной части цепи представляет собой геометрическую сумму токов  $I_1$  и  $I_c$  в обеих ветвях. При правильном выборе емкости ток  $I_2$  будет меньше тока  $I_1$ , а коэффициент мощности  $\cos \varphi_2$  в неразветвленной части цепи будет выше, чем коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$  в ветви с индуктивностью. Таким образом, присоединение правильно выбранной емкости параллельно (поперечно) индуктивности уменьшает ток в неразветвленной части цепи, т. е. ток, идущий от источника до точки присоединения потребителя. Явления при повышении коэффициента мощности посредством конденсаторов можно представить также, пользуясь понятием реактивной мощности. Как известно, элементы электрических схем, в которых ток отстает от приложенного на зажимах напряжения, принято называть приемниками реактивной мощности и энергии, а элементы, в которых ток опережает приложенное напряжение — источниками (генераторами) реактивной мощности и энергии.

Исходя из понятий об источниках и приемниках реактивной мощности, можно рассматривать повышение

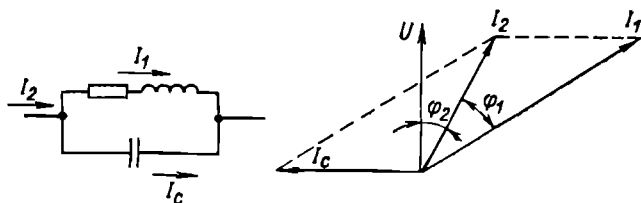


Рис. VIII.1. Схема и векторная диаграмма электрической цепи с параллельно включенной емкостью

коэффициента мощности посредством конденсаторов как присоединение источника реактивной мощности параллельно (поперечно) ее приемнику. После присоединения конденсаторов приемник получает реактивную мощность полностью или частично от них, а не от генераторов электростанции, питающей активной мощностью данную точку сети. Потребление реактивной мощности электроустановкой от электростанции уменьшается и, следовательно, уменьшаются реактивные нагрузки на участке сети от точки присоединения конденсаторов до электростанции. С этой позиции можно вообще рассматривать повышение коэффициента мощности, кроме повышения естественного коэффициента, как выбор наиболее рационального способа питания ее источников. Наконец, повышение коэффициента мощности позволяет повысить активную нагрузку  $P$  линий, трансформаторов и генераторов без повышения их полной нагрузки  $S$ . Если до этого линия или трансформатор работали уже на пределе допустимой нагрузки, то возможность дальнейшего повышения активной нагрузки без замены линии или трансформатора бывает тогда особенно эффективной. Формулы для расчета эффекта от повышения коэффициента мощности приведены в [37].

Установка силовых конденсаторов, строго говоря, несколько изменяет и активные нагрузки элементов сети, так как в результате, с одной стороны, уменьшаются потери активной мощности в элементах сети вследствие уменьшения их реактивных нагрузок и, с другой стороны, добавляются потери активной мощности в самих конденсаторах. Однако при расчете эффекта в элементах сети от повышения коэффициента мощности можно пренебречь изменением активных нагрузок элементов и считать, что установка конденсаторов изменяет только реактивные нагрузки. Следует указать еще на одно обстоятельство, вызываемое включением конденсаторных батарей. Как известно, линейный ток  $I$  в трехфазной цепи при симметрии системы напряжений и системы токов равен

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi}, \quad (\text{VIII.5})$$

где  $P$  — передаваемая активная мощность;  $U$  — линейное напряжение. Из этой формулы видно, что при постоянстве активной мощности  $P$  и напряжения  $U$  ток в цепи обратно пропорционален коэффициенту мощности.

Поскольку потери мощности в цепи пропорциональны квадрату тока, повышение коэффициента мощности и энергии в элементах энергетической системы (в линиях, трансформаторах и др.) обратно пропорционально квадрату коэффициента мощности. Значит, другим следствием повышения коэффициента мощности является уменьшение потерь напряжения в тех же элементах электрической системы и повышение уровня напряжения в сети.

### 3. Влияние продольной компенсации на режим работы крупных токоприемников

Способ компенсации реактивной мощности, при котором емкостное сопротивление конденсаторной батареи включается последовательно с сопротивлением нагрузки (рис. VIII.2), носит название продольной компенсации. В линии электропередачи происходит потребление реактивной мощности

$$Q_{\text{л}} = I^2 x_L. \quad (\text{VIII.6})$$

Вследствие наличия последовательно включенной конденсаторной батареи часть этой мощности компенсируется

$$Q_C = I^2 x_C. \quad (\text{VIII.7})$$

Таким образом, общее потребление реактивной мощности в линии после включения батареи составит

$$Q'_{\text{л}} = Q_{\text{л}} - Q_C = I^2 (x_L - x_C). \quad (\text{VIII.8})$$

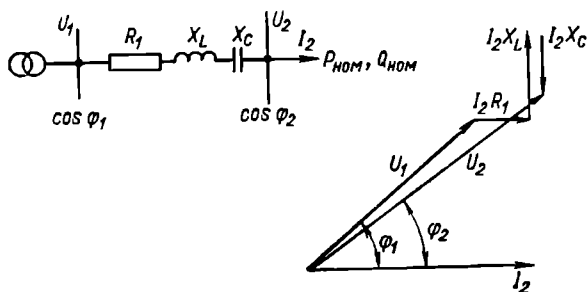


Рис. VIII.2. Принципиальная схема включения продольной компенсации и ее векторная диаграмма:

$U_1, U_2$  — напряжения у источника и потребителя электроэнергии соответственно;  $r_1, x_1$  — активное и реактивное сопротивление линии передачи,  $x_c$  — реактивное сопротивление конденсаторной батареи продольной компенсации,  $P_{\text{ном}}, Q_{\text{ном}}$  — активная и реактивная мощность потребителя

В случае, если  $x_L > x_C$ , будет происходить частичная компенсация реактивных потерь в линии. Если же  $x_L = x_C$ , то наблюдается 100 %-ная компенсация реактивной мощности, при которой  $\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2$  и, наконец, при  $x_L < x_C$  линия будет генерировать реактивную мощность и, следовательно,  $\cos \varphi_2 > \cos \varphi_1$ , так как

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{Q_{\text{ном}} + I^2 (x_L - x_C)}{P_{\text{ном}} + I^2 R} < \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{Q_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}}} . \quad (\text{VIII.9})$$

Из выражения (VIII.9) следует, что продольная компенсация принципиально может также, как поперечная компенсация, использоваться для повышения  $\cos \varphi$  крупных энергопотребителей.

Особенностью применения продольной компенсации является то, что она вызывает повышение напряжения на шинах потребителя, которое зависит от тока нагрузки. Это видно из векторной диаграммы напряжений (рис. VIII.2). При наличии в линии только активного и индуктивного сопротивлений напряжение  $U_2$  меньше  $U_1$  на значение потерь напряжения

$$\Delta U = \frac{P_{\text{ном}} R_1 + Q_{\text{ном}} x_L}{U_1} . \quad (\text{VIII.10})$$

При включении продольной компенсации

$$\Delta U' = \frac{P_{\text{ном}} R_1 + Q_{\text{ном}} (x_L - x_C)}{U_1} , \quad (\text{VIII.11})$$

а снижение потерь напряжения

$$\Delta U_{\kappa} = \Delta U - \Delta U' = Q x_C / U . \quad (\text{VIII.12})$$

Это объясняется тем, что в цепи линии появляется падение напряжения  $I_2 x_C$ , направленное противоположно падению напряжения  $I_2 x_L$ . Значение  $x_C$  может быть подобрано таким образом, что модуль вектора  $U_2$  будет равен  $U_1$  или больше его, когда  $\Delta U' < 0$ . Отсюда вытекает второе направление применения продольной компенсации как средства регулирования напряжения. При этом основное достоинство продольной компенсации состоит в автоматическом регулировании напряжения при изменении нагрузки потребителя. В этом случае значение реактивного сопротивления выбирается по следующему выражению

$$x_C = \frac{U_{\text{ном}} (\Delta U - \Delta U_{\text{доп}})}{100 \sqrt{3} I_{\text{доп}} \sin \varphi_2} , \quad (\text{VIII.13})$$

где  $U_{\text{ном}}$  — номинальное напряжение сети;  $I_{\text{доп}}$  — допустимый ток конденсаторной батареи;  $\Delta U$  — потери напряжения без продольной компенсации, %;  $\Delta U_{\text{доп}}$  — допустимое значение потерь напряжения, %.

Продольно-емкостная компенсация вследствие своих особенностей, как правило, применяется для крупных токоприемников с резкоменяющейся нагрузкой для снижения диапазона колебаний напряжения, например, для цехов с мощными сварочными трансформаторами, а также для установок, в которых по мере изменения активной нагрузки необходимо пропорционально менять реактивную мощность (крупные печные установки). К недостаткам продольной компенсации относятся возможность возникновения резонансных явлений при сквозных токах короткого замыкания и появления перенапряжений. Ликвидация этих недостатков требует специальных инженерных решений. Особенно тщательно следует подходить в этих вопросах к тем случаям, когда включение батареи конденсаторов происходит через трансформаторные цепи.

#### 4. Схемы включения конденсаторных батарей поперечной компенсации

На рис. VIII.3 представлены принципиальные электрические схемы включения конденсаторных батарей поперечной компенсации в цепь одной фазы печной установки. Включение конденсаторов в этих схемах предусматривается через различные трансформаторные цепи.

Непосредственное включение конденсаторов к низшей стороне печных трансформаторов обычно нецелесообразно, так как низшее напряжение печных установок относительно мало и не согласуется с величинами стандартных напряжений конденсаторов. Схема рис. VIII.3, а предусматривает включение конденсаторной батареи через специальный повышающий трансформатор 2, подсоединенный к стороне низшего напряжения электропечного трансформатора. При применении схемы рис. VIII.3, а наиболее выгодной точкой подключения конденсаторной установки являются выводы низшего напряжения печного трансформатора. При подключении конденсаторной установки к узлу короткой сети, расположенному ближе к электродам, уменьшение реактивных потерь в короткой сети за счет частичной разгрузки ее от реактивной составляющей тока будет меньше

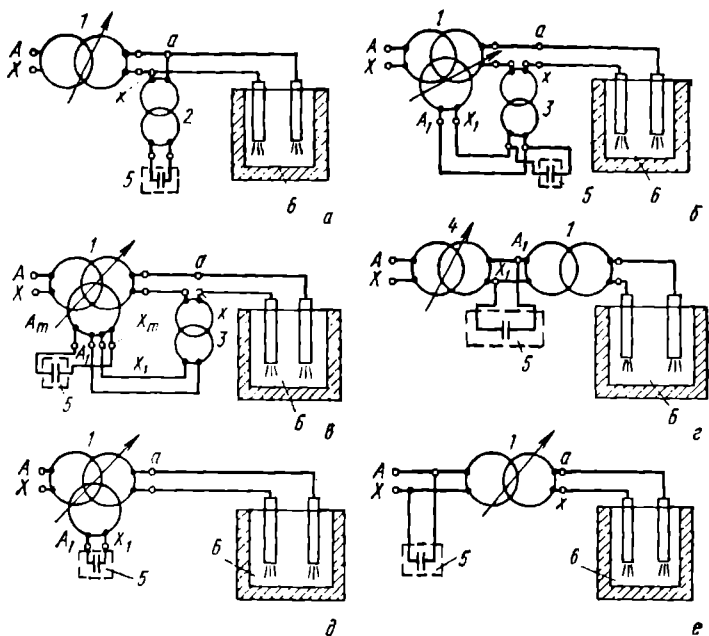


Рис. VIII.3. Схемы включения конденсаторных батарей поперечной компенсации:

1 — главный печной трансформатор; 2 — повышающий трансформатор; 3 — вольтодобавочный трансформатор; 4 — регулирующий трансформатор; 5 — конденсаторная батарея; 6 — печь

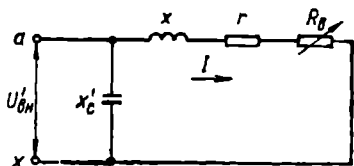


Рис. VIII.4. Эквивалентная схема электропечного контура с поперечной компенсацией

дополнительных потерь в шинопроводе малого сечения, подводящем емкостный ток от повышающего трансформатора 2 к узлу короткой сети.

Схемы рис. VIII.3, б и г предусматривают включение конденсаторной батареи на напряжение регулировочных обмоток печных трансформаторов. Схемы рис. VIII.3, в предусматривает включение конденсаторов на полное, постоянное по величине напряжение регулировочной обмотки главного трансформатора. Схема рис. VIII.3, д предполагает включение конденсаторной батареи в цепь специально изготовляемой для этой цели обмотки главного электропечного трансформатора. Схема рис. VIII.3, е представляет собой вариант компенсации реактивной мощности с высшей стороны электропечного трансформатора, т. е. непосредственно на сетевом напряжении. В зарубежной практике для мощных сталеплавильных печей наиболее распространение получила схема VIII.3, г, д. Регулировочный трансформатор 4 и конденсаторная батарея 5 устанавливаются вне печного цеха на показательной подстанции завода, и только печной трансформатор 3 устанавливается в цехе.

Учитывая, что сопротивления обмоток трансформаторов малы по сравнению с сопротивлениями остальных участков печной установки, схемы рис. VIII.3 могут быть представлены эквивалентной схемой рис. VIII.4.

При этом приведенное напряжение высшей стороны ( $U'_{вн}$ ) эквивалентной схемы будет равно напряжению холостого хода на выводах низшего напряжения печного агрегата. Приведенное реактивное сопротивление конденсаторной батареи в эквивалентной схеме может быть вычислено по выражениям табл. 8.3, в которой приняты следующие обозначения:  $U_{вн} = U_{АХ}$  — напряжение высшей стороны электропечного трансформатора;  $x_c$  — реактивное сопротивление конденсаторной батареи;  $k_1$  — коэффициент трансформации всего электропечного трансформаторного агрегата, равный отношению высшего напряжения  $U_{АХ}$  к низшему  $U_{ах}$  в опыте холостого хода;  $k_r$  — коэффициент трансформации главного печного трансформатора 1 (рис. VIII.3, б, г), равный отношению высшего напряжения  $U_{А1Х1}$  (рис. VIII.3, г) и  $U_{ах}$  (рис. VIII.3, б) к низшему  $U_{ах}$ ;  $k_3$  — отношение высшего напряжения главного трансформатора (рис. VIII.3, б) к напряжению регулировочной обмотки вольтодобавочного трансформатора  $U_{А1Х1}$ ;  $k_4$  — отношение высшего напряжения главного трансформатора  $U_{АХ}$  (рис. VIII.3, в) к полно-

ВЫРАЖЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЕЧНЫХ УСТАНОВОК С ПОПЕРЕЧНО ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

| Тип схемы<br>(рис. VIII.3) | Приведенное сопротивление<br>конденсаторной батареи $x_c$           | Рабочая мощность<br>конденсаторной батареи $Q_c$        | Коэффициент мощности печи<br>при компенсации $\cos \varphi_k$                                     |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a                          | $x_c \left( \frac{1}{k_5^2} \right) = \text{const}$                 | $\frac{U_{BH}^2}{x_c} \left( \frac{k_5}{k_1} \right)^2$ | $\sqrt{1 - \frac{I^2 k_1^2}{U_{BH}^2} \left( x - \frac{U_{BH}^2 k_5^2}{I^2 x_c k_1^2} \right)^2}$ |
| б                          | $x_c \left( \frac{k_3}{k_7} + \frac{1}{k_7} \right)^2 = \text{var}$ | $\frac{U_{BH}^2}{x_c} \left( \frac{1}{k_3} \right)^2$   | $\sqrt{1 - \frac{I^2 k_1^2}{U_{BH}^2} \left( x - \frac{U_{BH}^2}{I^2 x_c k_3^2} \right)^2}$       |
| в                          | $x_c \left( \frac{k_4}{k_1} \right)^2 = \text{var}$                 | $\frac{U_{BH}^2}{x_c} \left( \frac{1}{k_4} \right)^2$   | $\sqrt{1 - \frac{I^2 k_1^2}{U_{BH}^2} \left( x - \frac{U_{BH}^2}{I^2 x_c k_4^2} \right)^2}$       |
| г                          | $x_c \frac{1}{k_2^2} = \text{const}$                                | $\frac{U_{BH}^2}{x_c} \left( \frac{k_2}{k_1} \right)^2$ | $\sqrt{1 - \frac{I^2 k_1^2}{U_{BH}^2} \left( x - \frac{U_{BH}^2 k_2^2}{I^2 x_c k_1^2} \right)^2}$ |
| д                          | $x_c \frac{1}{k_6^2} = \text{const}$                                | $\frac{U_{BH}^2}{x_c} \left( \frac{k_6}{x_c} \right)^2$ | $\sqrt{1 - \frac{I^2 k_1^2}{U_{BH}^2} \left( x - \frac{U_{BH}^2 k_6^2}{I^2 x_c k_1^2} \right)^2}$ |
| е                          | $x_c \frac{1}{k_1^2} = \text{var}$                                  | $\frac{U_{BH}^2}{x_c}$                                  | $\sqrt{1 - \frac{I^2 k_1^2}{U_{BH}^2} \left( x - \frac{U_{BH}^2}{I^2 x_c} \right)^2}$             |



му напряжению всех регулирующей обмотки  $U_{тАмх}$ ;  $k_5$  — отношение высшего напряжения повышающего трансформатора 2 (рис. VIII.3, а) к низшему напряжению  $U_{ах}$ ;  $k_6$  — отношение напряжения промежуточной обмотки главного трансформатора  $U_{Ах}$  (рис. VIII.3, б) к низшему напряжению  $U_{ах}$ ;  $k_7$  — коэффициент трансформации вольтодобавочного трансформатора 3 (рис. VIII.3, в).

Как видно из выражений табл. 8.3, мощность конденсаторных батарей во всех схемах рис. VIII.3 будет колебаться пропорционально квадрату изменения сетевого напряжения и не зависит от величины тока печной установки. Последнее определяет принадлежность этих схем к поперечной компенсации реактивной мощности.

Реактивная мощность и  $\cos \varphi$  электропечных агрегатов, оборудованных установками поперечной компенсации, составит

$$Q_k = I^2 \left( x - \frac{Q_c}{I^2} \right), \quad (\text{VIII.14})$$

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - y \left( x - \frac{Q_c}{I^2} \right)^2}, \quad y = \frac{\sqrt{3} I}{U} \quad (\text{VIII.15})$$

Выражения для коэффициента мощности печей при различных схемах компенсации, приведенные в табл. 8.3, получены из формулы (VIII.15) с учетом значений  $Q_c$ , указанных в этой таблице.

Анализ выражений  $\cos \varphi$  (табл. 8.3) показывает, что коэффициент мощности будет резко изменяться при колебаниях тока электродов, а в схемах табл. 3, а, г, д, также при изменении ступеней напряжения вследствие изменения коэффициента  $k_1$ .

## 5. Схемы включения конденсаторных батарей продольной компенсации

На рис. VIII.5 представлены схемы включения конденсаторных батарей продольной компенсации. В схеме рис. VIII.5, а приводится вариант включения установки продольной компенсации (УПК) через специальный разделительный трансформатор, в схеме б — в цепь обмотки высшего напряжения вольтодобавочного трансформатора и в схеме в — со стороны высшего напряжения главного трансформатора, имеющего постоянный коэффициент трансформации. Схема (рис. VIII.5, г)

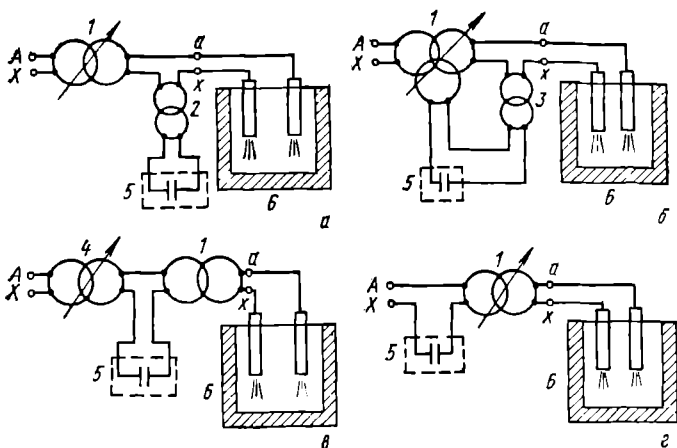


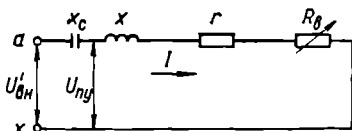
Рис. VIII.5. Схема включения конденсаторной батареи продольной компенсации:

1 — главный трансформатор; 2 — разделительный трансформатор; 3 — повышающий трансформатор; 4 — регулирующий трансформатор; 5 — конденсаторная батарея; 6 — печь

предусматривает включение батареи УПК в питающую линию электропечного трансформатора.

Включение конденсаторов УПК непосредственно в разрез короткой сети электропечной установки не рассматривается, так как это практически неосуществимо.

Рис. VIII.6. Эквивалентная схема электропечного контура с УПК



В этом варианте пришлось бы иметь гигантскую по размерам конденсаторную батарею, которая пропускала бы токи около 100 кА при падении напряжения на ней в несколько десятков вольт.

Можно показать, что с достаточной для инженерных расчетов точностью все схемы продольной компенсации могут быть представлены эквивалентной схемой рис. VIII.6, в которой приведенное значение емкостного сопротивления  $x'_c$  будет включено последовательно с электрическим контуром электропечной установки.

В табл. 8.4 приведены расчетные выражения для определения  $x'_c$  и  $\cos \varphi$  для каждого из вариантов включения конденсаторных батарей УПК.

В этой таблице приняты те же обозначения для коэффициентов трансформации, что и в табл. 8.3, а именно:  $k_1$  — коэффициент трансформации всего электропечного трансформаторного агрегата;  $k_2$  — коэффициент трансформации главного печного трансформатора;  $k_3$  — коэффициент трансформации разделительного трансформатора;  $k_7$  — коэффициент трансформации вольтодобавочного трансформатора.

Для всех схем, кроме схемы рис. VIII.5, а, величины  $x'_c$  не зависят от коэффициента трансформации электропечного трансформатора и от величины тока и остается постоянной во всех режимах работы печи. При включении конденсаторной батареи в питающую линию электропечного агрегата величина  $x'_c$  будет меняться по мере переключения ступеней напряжения на печном трансформаторе.

В соответствии с этим при снижении напряжения на выводах стороны низшего напряжения электропечного трансформатора (увеличении  $k_1$ ) при схеме рис. VIII.5, а коэффициент мощности будет падать более резко, чем при других схемах включения конденсаторных батарей установок продольной компенсации.

Мощные конденсаторные батареи электропечей представляют собой набор конденсаторов, соединенных в последовательно-параллельные секции. До недавнего времени в качестве конденсаторов, из которых комплектовались батареи, чаще всего использовались конденсаторы продольно-емкостной компенсации типа КПМ (табл. 8.5). В настоящее время в СССР выпускаются конденсаторы, соответствующие ГОСТ 1282—72. Технические данные конденсаторов, применяемых для УПК, приведены в табл. 8.3. Конденсаторы на номинальное напряжение ниже 1,05 кВ имеют встроенные предохранители внутри корпуса. При комплектовании батареи конденсаторами с большим номинальным напряжением необходима установка внешних предохранителей.

При комплектовании батареи количество последовательно включенных конденсаторов в фазе определяется максимальным длительно возможным рабочим напряжением  $U_{\text{стmax}}$ . Для конденсаторных батарей поперечной компенсации эти величины будут определяться высшей величиной напряжения, а при включении в трансформа-

## ВЫРАЖЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЕЧНЫХ УСТАНОВОК С УПК

| Тип<br>схемы<br>(рис.<br>VIII.5) | Приведенное сопротивление<br>конденсаторной батареи<br>$x_c$ | Рабочая мощность конденса-<br>торной батареи<br>$Q_c = I^2 x_c$ | Реактивная мощность,<br>потребляемая из сети<br>$Q_K = I^2 \left( x - x_c \right)$ | Коэффициент мощности печи<br>при компенсации $\Phi_K$                                 |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| a                                | $x_c \frac{1}{k_5^2} = \text{const}$                         | $I^2 x_c / k_5^2$                                               | $I^2 \left( x - \frac{x_c}{k_5^2} \right)$                                         | $\sqrt{1 - \frac{I^2 k_1^2}{U_{\text{ВН}}^2} \left( x - \frac{x_c}{k_5^2} \right)^2}$ |
| б                                | $x_c \frac{1}{k_7^2} = \text{const}$                         | $I^2 x_c / k_7^2$                                               | $I^2 \left( x - \frac{x_c}{k_7^2} \right)$                                         | $\sqrt{1 - \frac{I^2 k_1^2}{U_{\text{ВН}}^2} \left( x - \frac{x_c}{k_7^2} \right)^2}$ |
| в                                | $x_c \frac{1}{k_2^2} = \text{const}$                         | $I^2 x_c / k_2^2$                                               | $I^2 \left( x - \frac{x_c}{k_2^2} \right)$                                         | $\sqrt{1 - \frac{I^2 k_1^2}{U_{\text{ВН}}^2} \left( x - \frac{x_c}{k_2^2} \right)^2}$ |
| г                                | $x_c \frac{1}{k_1^2} = \text{var}$                           | $I^2 x_c / k_1^2$                                               | $I^2 \left( x - \frac{x_c}{k_1^2} \right)$                                         | $\sqrt{1 - \frac{I^2 k_1^2}{U_{\text{ВН}}^2} \left( x - \frac{x_c}{k_1^2} \right)^2}$ |

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ МОЩНЫХ БАТАРЕЙ

| Тип конденсаторов | Вид исполнения        | Типовая мощность, кват | Номинальное напряжение, В | Номинальный ток, А | Типовая емкость, мкФ | Реактивное сопротивление, Ом | Предельно допустимое число параллельных секций, шт. | Габаритные размеры, мм | Масса, кг | Вид защиты конденсатора   |
|-------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|--------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------|-----------|---------------------------|
| КПМ 0,66-25-1     | Наружной тановки      | 25                     | 660                       | 41,7               | 220                  | 14,4                         | 50                                                  | 330×140×1040           | 60        | Внутренние предохранители |
| КПМ 0,66-50-1     | То же                 | 50                     | 600                       | 83,7               | 442                  | 7,2                          | 25                                                  | 646×126×1185           | 150       | То же                     |
| КПМ 1-50-1        | »                     | 50                     | 1 000                     | 50,0               | 160                  | 20,2                         | 25                                                  | 646×126×1050           | 125       | »                         |
| КПМ 1-50-1-1      | »                     | 50                     | 1 000                     | 50,0               | 160                  | 20,0                         | 25                                                  | 646×126×739            | 125       | »                         |
| КСША 0,66-40      | »                     | 40                     | 660                       | 60,7               | 292                  | 10,9                         | 31                                                  | 380×120×730            | 53        | »                         |
| КСП 0,66-40       | »                     | 40                     | 660                       | 60,7               | 292                  | 10,9                         | 31                                                  | 380×120×790            | 54        | »                         |
| КМ2 0,66-26       | Внутренней ус-тановки | 26                     | 660                       | 39,4               | 190                  | 16,7                         | 48                                                  | 380×120×730            | 48,5      | Внешние предохранители    |
| КС2 0,66-40       | Наружной ус-тановки   | 26                     | 660                       | 39,4               | 190                  | 16,7                         | 48                                                  | 380×120×793            | 48,5      | Внутренние предохранители |
| КМ2А26,3-26       | То же                 | 26                     | 6 300                     | 4,13               | 2,08                 | 1525                         | —                                                   | 380×120×833            | 48,4      | Внешние предохранители    |
| КМ2А-10,5-26      | »                     | 26                     | 10 500                    | 2,48               | 0,752                | 4230                         | —                                                   | 380×120×873            | 48,3      | То же                     |
| КС1-1,05-30-У1    | »                     | 30                     | 1 050                     | 28,57              | 86,8                 | 36,7                         | —                                                   | 380×120×325            | —         | Внутренние предохранители |
| КС1-1,05-37,5-У3  | »                     | 37,5                   | 1 050                     | 35,71              | 108,3                | 29,4                         | —                                                   | 380×120×325            | —         | То же                     |
| КС2-1,05-60-У1    | »                     | 60                     | 1 050                     | 57,14              | 173,1                | 18,4                         | —                                                   | 380×120×640            | —         | »                         |

|                    |   |      |        |       |       |      |   |             |   |                            |
|--------------------|---|------|--------|-------|-------|------|---|-------------|---|----------------------------|
| КС2-1, 05-75-У3    | » | 75   | 1 050  | 71,43 | 216,6 | 14,7 | — | 380×120×640 | — | »                          |
| КС1-6, 30-30-У1    | » | 30   | 6 300  | 4,76  | 2,41  | 1323 | — | 380×120×325 | — | Внешние пре-<br>дхранители |
| КС1-6, 30-37,5-У1  | » | 37,5 | 6 300  | 5,95  | 3,00  | 1059 | — | 380×120×325 | — | То же                      |
| КС2-6, 30-60-У1    | » | 60   | 6 300  | 9,52  | 4,81  | 662  | — | 380×120×640 | — | »                          |
| КС2-6, 30-75-У3    | » | 75   | 6 300  | 11,90 | 6,02  | 529  | — | 380×120×640 | — | »                          |
| КС2-6, 30-100-У3   | » | 100  | 6 300  | 15,87 | 8,02  | 397  | — | 380×120×640 | — | »                          |
| КС1-10, 50-30-У1   | » | 30   | 1 050  | 2,86  | 0,867 | 3671 | — | 380×120×325 | — | »                          |
| КС1-10, 50-37,5-У3 | » | 37,5 | 10 500 | 3,57  | 1,081 | 2941 | — | 380×120×325 | — | »                          |
| КС2-10, 50-60-У1   | » | 60   | 10 500 | 5,71  | 1,73  | 1839 | — | 380×120×640 | — | »                          |
| КС2-10,5-75-У3     | » | 75   | 10 500 | 7,14  | 2,17  | 1470 | — | 380×120×640 | — | »                          |
| КС2-10, 5-100-У3   | » | 100  | 10 500 | 9,52  | 2,89  | 1103 | — | 380×120×640 | — | »                          |
| КСПК-1, 05-120-У1  | » | 120  | 10 500 | 114,3 | 346,2 | 9,2  | — | 380×120×640 | — | »                          |

торные цепи, кроме того, величиной высшей ступени электропечного трансформатора.

Для конденсаторных батарей продольной компенсации наибольшее рабочее напряжение на батарее будет достигаться при наибольшем рабочем токе батареи:

$$U_{\text{сmax}} = I_{\text{сmax}} X_c.$$

## 6. Рабочие токи и напряжения электропечных агрегатов, оборудованных УПК

Включение в цепь печной установки УПК требует специального подхода к вопросу выбора величины рабочих токов и напряжений трансформаторов руднотермических печей. При этом оказывается необходимым, зная заданную производительность печи и оптимальное для данного узла энергосистемы значение коэффициента мощности  $\cos \varphi_0$ , найти параметры печного трансформатора и конденсаторной батареи УПК.

Как известно, зная величины производительности печи и ее коэффициента мощности, можно весьма просто рассчитать необходимую полную мощность печного трансформатора ( $S$ ), которую последний будет потреблять из сети. Следовательно, задача сведется к необходимости определения параметров печного трансформатора и конденсаторной батареи УПК при заданном значении  $S$  и средневзвешенном значении  $\cos \varphi_0$ . Для мощных руднотермических печей целесообразно, чтобы в диапазоне всех рабочих ступеней печной трансформатор сохранял бы свою мощность  $S$ . Для печи с таким трансформатором средняя сетевая мощность составит  $P_c = S \cos \varphi_0$ . Зная сетевую мощность печи  $P_c$ , можно найти средний ток в электроде печи  $I_{\text{э.ср}}$ , который необходимо иметь для обеспечения нормального проведения технологического процесса. Величина этого тока будет определяться для печи с  $m$  электродами следующим выражением.

$$I_{\text{э.ср}} = \sqrt{\left[ \frac{P_c/m}{(1-2n)r_y} + \frac{c^2 (P_c/m)^{2n}}{2(1-n)(1-2n)r_y^2} \right]} - \sqrt{\left[ \frac{P_c/m}{(1-2n)r_y} + \frac{c^2 (P_c/m)^{2n}}{2(1-n)(1-2n)r_y^2} \right]^2} - \frac{(P_c/m)^2}{(1-n)(1-2n)r_y^2} \quad (\text{VIII.16})$$

Обозначения в выражении (VIII.16) аналогичны принятым в формуле (VIII.2).

Зная величину среднего тока в электродах, можно найти величину среднего фазного напряжения холостого хода трансформаторного агрегата

$$U_{\phi, \text{ср}} = \frac{S}{3I_{\text{э, ср}}} \quad (\text{VIII.17})$$

В процессе эксплуатации руднотермических электропечей их рабочие токи и напряжения колеблются в зависимости от изменения состава и качества сырьевых материалов и условий ведения технологического процесса. В сторону увеличения напряжения этот коэффициент на карбидных печах 40—60 МВ·А был равен  $k_{\text{в}}=1,06$  и в сторону понижения напряжения  $k_{\text{н}}=1,12$ . С учетом возможных колебаний  $c$  и  $n$  от принятых расчетных значений диапазон постоянной мощности должен включать рабочие напряжения, которые будут выше и ниже расчетных  $U_{\phi}$  на 10 %. При этом весь диапазон величин рабочих напряжений  $U_{\phi}$  и токов в электродах  $I_{\text{э}}$  будет определяться из следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} U_{\phi \text{max}} &= k_{\text{в}} U_{\phi, \text{ср}}, & I_{\text{эmin}} &= I_{\text{э, ср}} k_{\text{в}}, \\ U_{\phi \text{min}} &= U_{\phi, \text{ср}} / k_{\text{н}}, & I_{\text{эmax}} &= k_{\text{н}} I_{\text{э, ср}}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{VIII.18})$$

Фазные напряжения определяемые выражениями (VIII.18), соответствуют напряжениям холостого хода электропечных трансформаторов. Следует иметь в виду, что наличие УПК в схемах электропечных агрегатов вызывает существенное различие уровней напряжений отдельных обмоток трансформатора в режимах работы печи под нагрузкой и в режиме холостого хода.

Напряжение на выводах низшего напряжения трансформаторного агрегата, оборудованного УПК, складывается из приведенных значений напряжения высшей стороны  $U_{\text{в.н}}$  и падения напряжения в конденсаторной

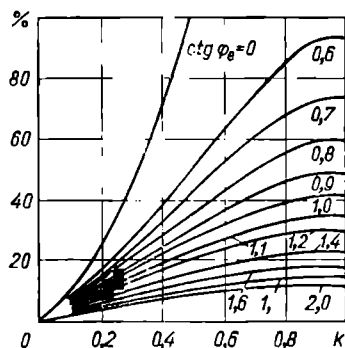


Рис. VIII.7. Зависимость относительного увеличения напряжения от степени компенсации



батареи  $U_c$  и равно падению напряжения в цепи электрического контура печи. Это напряжение может быть для одной фазы печи определено из выражения:

$$\left. \begin{aligned} U_{п.у} &= I_3 \sqrt{(R - r_T)^2 + (x_y - x_T)^2}, \\ R &= \frac{S \cos \varphi_K}{I_3^2}; \quad \cos \varphi_K = \sqrt{1 - (x_K / U'_{в.н})^2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{VIII.19})$$

Относительная величина увеличения напряжения  $\Delta U = U_{пу} - U'_{вн}$ , получаемая при включенной УПК в работу, может быть определена из номограммы (рис. VIII.7), в которой приняты следующие обозначения:

$$\operatorname{arctg} \varphi_e = R / x_y, \quad k = x'_c / x_y.$$

В данных номограммы не учитывается падение напряжения в трансформаторе, что учтено выражением (VIII.19).

При включении УПК в цепь вольтодобавочного трансформатора (рис. VIII.5, б) повышение напряжения будет иметь место на его регулировочной обмотке и обмотке низшего напряжения (РО и НН). Величина напряжения на РО может быть определена из следующего выражения:

$$U_{A2X2} = \sqrt{U_{A1X1}^2 \pm 2U_{A1X1} I_c x_c \sin \varphi_K + (I_c x_c)^2}, \quad (\text{VIII.20})$$

где  $U_{AX}$  — напряжение х.х. вольтодобавочного трансформатора.

## 7. Параметры конденсаторной батареи УПК

Мощность конденсаторной батареи поперечной компенсации электропечей, так же как для электросиловых установок, чаще всего определяют исходя из следующего выражения:

$$Q_c = P_{ср} (\operatorname{tg} \varphi_e - \operatorname{tg} \varphi_3), \quad (\text{VIII.21})$$

где  $P_{ср}$  — активная нагрузка предприятия в часы пик нагрузки энергосистемы;

$\operatorname{tg} \varphi_e$  — тангенс, соответствующий оптимальному коэффициенту мощности;

$\operatorname{tg} \varphi_3$  — тангенс, соответствующий оптимальному коэффициенту мощности.

Однако применение выражения (VIII.21) для рудно-термических печей с УПК затруднено тем обстоятельством, что при заданном значении  $S$  печи,  $P_{ср}$  и  $\operatorname{tg} \varphi_e$  явля-

ются как было показано выше, функциями величины  $\operatorname{tg} \varphi_3$  и, следовательно, непосредственно использовать выражение (VIII.2) не представляется возможным. Поэтому более целесообразно определять мощность конденсаторной батареи УПК, исходя из баланса реактивной мощности печи, обеспечивающего требуемый коэффициент мощности  $\cos \varphi_3$  при полной мощности установки  $S$ , или же в ее режимах работы в часы пик нагрузки энергосистемы. Рабочая мощность конденсаторной батареи установки продольной компенсации 3-фазной печи должна составлять:

$$Q_{\text{ср}} = 3I_{\text{э.р}}^2 x_y - S \sin \varphi_3, \quad (\text{VIII.22})$$

где  $x_y$  — реактивное сопротивление одной фазы печи.

Для всех схем включения УПК, за исключением случая включения конденсаторной батареи с высшей стороны печного трансформатора, мощность конденсаторной батареи изменяется пропорционально квадрату величины тока, протекающего по электродам печи.

При этом максимальные и минимальные величины рабочих мощностей конденсаторной батареи УПК при работе печи на одной и той же мощности  $S$ , но на различных токах, равны:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{max}} &= 3I_{\text{эmax}}^2 x_y - (I_{\text{эmax}}/I_{\text{э.ср}})^2 S \sin \varphi_3 = k_{\text{н}} Q_{\text{ср}}, \\ Q_{\text{min}} &= 3I_{\text{эmin}}^2 x_y - (I_{\text{эmin}}/I_{\text{э.ср}})^2 S \sin \varphi_3 = Q_{\text{ср}}/k_{\text{в}}^2. \end{aligned} \right\} (\text{VIII.23})$$

При включении УПК в цепь обмотки высшего напряжения печного трансформатора мощность конденсаторной батареи в диапазоне постоянной мощности будет оставаться постоянной.

Следует иметь в виду, что при выборе мощности конденсаторной батареи УПК необходимо обеспечить, чтобы даже при работе на низших ступенях напряжения печь работала на восходящей ветви кривой  $P_{\text{пол}} = f(I_3)$ . Это условие выполняется, когда коэффициент мощности на низшей ступени будет больше величины  $\cos \varphi_{P_{\text{полmax}}}$ , что определяет неравенство

$$Q_{\text{max}} > I_{\text{эmax}}^2 x_y - S \sqrt{1 - \cos \varphi_{P_{\text{полmax}}}}. \quad (\text{VIII.24})$$

Если неравенство (VIII.24) не выполняется, то оно оказывается определяющим в выборе мощности конденсаторной батареи, что может иметь место при малых значениях  $\cos \varphi_3$  и больших значениях  $k_{\text{н}}$ .

В этом случае, как легко показать, значение коэффи-

цента мощности на средней ступени может быть определено из следующего выражения:

$$\cos \varphi_{\text{ср.ст}} = \sqrt{1 - \frac{1 - \cos^2 \varphi_{\text{н.ст}}}{k_{\text{н}}^4}}. \quad (\text{VIII.25})$$

При этом коэффициент мощности на низшей рабочей ступени напряжения печного трансформатора  $\cos \varphi_{\text{н.ст}}$  должен приниматься равным  $\cos \varphi_{P_{\text{полмах}}}$ . Если принять для мощных руднотермических печей  $\cos \varphi_{P_{\text{полмах}}} \approx 0,75$  и  $k_{\text{н}} = 1,12$ , то  $\cos \varphi_{\text{ср.ст}}$  окажется равным  $\approx 0,88$ .

Следовательно, условие (VIII.25) будет всегда выполнено в случае, когда  $\cos \varphi_{\text{э}}$  выбирается равным или большим 0,88, что и следует иметь в виду при определении параметров печной установки с УПК.

В соответствии с действующими положениями [39] и преysкурантом № 09—01 «Тарифы на электрическую энергию, отпускаемую энергосистемами и электростанциями Минэнерго СССР» регламентируются:

а) экономически обоснованное значение реактивной мощности, которая может быть передана из энергосистемы в режиме ее наибольшей активной нагрузки в сеть потребления,  $Q_{\text{э1}}$ ;

б) экономически обоснованное значение реактивной мощности, которая может быть передана из энергосистемы в режиме ее наименьшей активной нагрузки,  $Q_{\text{э2}}$ ;

в) значение реактивной мощности, которая может быть передана из энергосистемы в послесаварийных режимах в сеть потребителя,  $Q_{\text{а}}$ .

Для выполнения задаваемых энергоснабжающей организацией условий потребления реактивной мощности потребитель должен снизить ее потребление в режиме наибольших нагрузок энергосистемы на величину  $\delta Q = Q_{\text{ф1}} - Q_{\text{э1}}$ , где  $Q_{\text{ф1}}$  — фактическая реактивная нагрузка потребителя при полной мощности.

Для заводов, оборудованных крупными руднотермическими и сталеплавильными печами,  $Q_{\text{ф}}$  на 90—98 % будет определяться их потреблением.

Обеспечение  $\delta Q$  потребителями может быть выполнено либо за счет снижения мощности печей, когда последние выступают как потребители-регуляторы, либо за счет применения искусственной компенсации реактивной мощности. Иногда возможно применение обоих приемов.

Величина  $Q_{\text{э1}}$  определяется из выражения  $Q_{\text{э1}} = \alpha P_{\text{ф}}$ , где  $P_{\text{ф}}$  — фактическая активная нагрузка потребителя в

часы наибольшей нагрузки энергосистемы,  $\alpha$  — коэффициент, колеблющийся от 0,2 до 0,47 в зависимости от энергосистемы и напряжения питающей подстанции.

Таким образом, в соответствии с балансом реактивной мощности предприятия задается определенное значение потребляемой реактивной мощности одной печи  $Q_{п-эл}$ , на которой необходимо выбирать мощность установок компенсации реактивной мощности

$$Q_{сп1} = 3I_{р1}^2 x_y - Q_{эл},$$

где  $I_{р1}$  — наибольший рабочий ток, который может иметь печь в часы пик нагрузки энергосистемы.

Аналогично должен быть проверен режим минимума нагрузки энергосистемы и определена величина  $Q_{сп2}$ .

В случае их существенного отличия должно применяться регулирование емкости конденсаторной батареи. Как правило, при применении УПК этого не требуется, а при использовании поперечной компенсации необходима ступенчатая схема включения ее батарей\*.

Оптимальному значению  $Q_{эл1}$  соответствует определенное значение  $\cos \varphi$ , на которое и должен рассчитываться печной агрегат с УПК или выбираться мощность поперечной компенсации по формуле (VIII.21).

В случае отклонения технологического режима от нормального, что может быть вызвано изменением состава или условий подготовки шихтовых материалов, а также нарушением режима слива, печная установка в течение нескольких дней может работать на низшей ступени напряжения. Поэтому в периоды наибольшей нагрузки энергосистемы печная установка может иметь коэффициент мощности, равный  $\cos \varphi_{н.ст.}$ . Конденсаторная батарея в этом случае должна быть выбрана из условия приравнивания заданного энергосистемой  $\cos \varphi_{эл}$  (соответствующего  $Q_{эл1}$  коэффициенту мощности печи при работе ее на низшей ступени трансформатора  $\cos \varphi_{н.ст.}$ ). При этом среднее значение коэффициента мощности определяется из выражения (VIII.25), мощность конденсаторной батареи — из выражений (VIII.22) и (VIII.24). Токи и напряжения выбираются исходя из уравнений (VIII.16) ÷ (VIII.18).

На рис. VIII.8 приведена номограмма, позволяющая весьма просто определять величину  $Q_{с1}$  для различных

---

\* Это требует дополнительной аппаратуры (токоограничивающие реакторы и приборы защиты от перенапряжения).

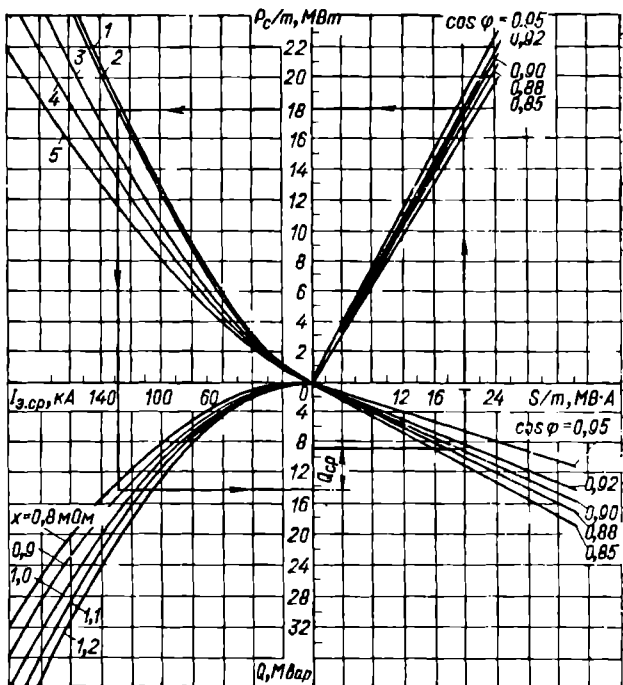


Рис. VIII.8. Номограмма определения мощности конденсаторной батареи УПК руднотермических печей ( $r_y = 0,1 \text{ МОм}$ ):

1 — карбид кальция, феррохром; 2 — ферросилиций 45 %, открытая печь; 3 — силикомарганец; 4 — силикохром; 5 — ферросиликохром

типов печей, различных значений их реактивного сопротивления и оптимального значения  $\cos \varphi_z$ .

На основании изложений методики, исходя из оптимального значения  $\cos \varphi_z = 0,9$  и  $x = 0,9 \text{ МОм}$ , были рассчитаны величины максимальных рабочих мощностей конденсаторных батарей для различных типов руднотермических печей. Результаты этих расчетов представлены в виде кривых зависимости  $Q_{\max} = f(S)$  (рис. VIII.9). Кривые  $Q_{\max} = f(S)$  отсекают на оси абсцисс предельные мощности руднотермических печей  $S_n$ , при превышении которых становится необходимым применение УПК.

Характер кривых рис. VIII.9 свидетельствует о том, что по мере увеличения мощности печей относительный расход мощности конденсаторных батарей ( $\beta = Q_{\max}/S$ ) весьма существенно возрастает. Особенно резкое возрас-

тание наблюдается у трехэлектродных печей для производства силумина и ферромарганца мощностью выше 20—30 МВ·А, когда  $\beta$  составляет (0,8—1) Мвар/МВ·А, в то время как для остальных типов печей мощностью 30—60 МВ·А эта величина не превышает (0,2—0,4) Мвар/МВ·А. Последнее обстоятельство явилось од-

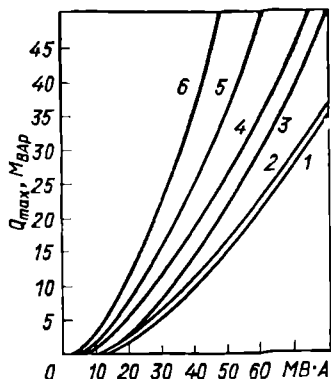


Рис. VIII.9. Установленная мощность конденсаторной батареи УПК руднотермических печей ( $\cos \Phi = 0.9$ ;  $X_U = 0.9$  мОм):

1 — карбид кальция; 2 — 45 %-ный ферросилиций, открытая печь; 3 — шестиэлектродная печь ферромарганца; 4 — 45 %-ный ферросилиций, закрытая печь; 5 — ферромарганец, трехэлектродная печь; 6 — силумин

ной из основных причин применения шестиэлектродных печей для вышеназванных продуктов.

Полученное выше значение  $Q_{\max}$  должно быть распределено по фазам печной установки.

Для 3-электродных круглых и прямоугольных шестиэлектродных печей мощности конденсаторных батарей различных фаз равны между собой  $Q_{1c} = Q_{2c} = Q_{3c\max}/3$ , а для мощных 3-электродных прямоугольных печей целесообразно иметь одинаковые мощности в 1-й и 3-й фазе  $Q_{1c} = Q_{3c} = Q_{3c\max}/2$ ,  $Q_{2c} = 0$ .

Конденсаторная батарея каждой фазы УПК состоит из параллельно-последовательно соединенных конденсаторов (рис. 10).

Число параллельно включенных конденсаторов  $n_{\text{пар}}$  и последовательно включенных групп  $n_{\text{посл}}$  будет определяться из выражения:

$$\left. \begin{aligned} n_{\text{пар}} &= \frac{I_{\Sigma\max}}{k_{p.t} k_{cx} I_N k_p k_a}; \\ n_{\text{посл}} &= \frac{Q_{c\Phi\max}}{n_{\text{пар}} Q_{pN}}; \\ Q_{pN}^* &= \left( \frac{I_{\Sigma\max}}{k_{p.t} k_{cx} n_{\text{пар}} I_N} \right)^2 Q_N, \end{aligned} \right\} \quad (\text{VIII.26})$$

где  $I_N$ ,  $Q_N$  — номинальный ток и номинальная мощность одного конденсатора;  $k_{p.\tau}$  — коэффициент трансформации разделительного трансформатора;  $k_{cx}$  — коэффициент схемы, который для трехэлектродных печей со схемой соединения звезда с низшей стороны и для шестиэлектродных печей равен 1, а для схемы соединения треугольник на электроде  $k_{cx}$  равен  $\sqrt{3}$ ;  $Q_{pN}$  — расчетная мощность одного конденсатора;  $k_z$  — коэффициент запаса, учитывающий различие величин емкостных сопротивлений отдельных конденсаторов в параллельной цепи;  $k_p$  — коэффициент запаса, учитывающий возможность обеспечения нормальной работы конденсаторов при выходе из строя одного конденсатора либо 10—12 % секции в параллельной цепи;  $k_z$ ,  $k_p$  — в условиях УПК руднотермических печей следует принимать равными 0,9.

Следует иметь в виду, что предпочтительной схемой соединения конденсаторов является схема, предусматривающая выполнение перемычек через один конденсатор (рис. VIII.10). При этом число параллельно соединенных конденсаторов в ряду не должно превышать

$$n_{\text{пармак}} = \frac{2W_R}{CU^2}.$$

где  $W_R$  — количество допускаемого выделения энергии при пробое боковой изоляции;  $U$  — максимальное напряжение, до которого могут быть заряжены конденсаторы;  $C$  — емкость конденсатора.

Для случая применения конденсаторов типа КПМ-1-50-1 с учетом установки разрядника  $U = 2U_N$  и  $n_{\text{пармак}} = 12$ .

Соответственно номинальные токи и напряжения конденсаторной батареи УПК составят:

$$I_c = \frac{I_{\text{амак}}}{k_{p.\tau} k_{cx}}; \quad U_c = \frac{x_{cN} n_{\text{полл}} I_c}{n_{\text{пар}}}, \quad (\text{VIII.27})$$

где  $x_{cN}$  — номинальное сопротивление одного конденсатора.

Следует отметить, что форма кривой тока в электродах большинства мощных руднотермических печей является практически синусоидальной и высшие гармонические составляющие содержатся в токах промежуточной цепи в таком малом количестве (2—3 %), что, как показали расчеты, увеличивать из-за них установленную мощность конденсаторных батарей не представляется необходимым.

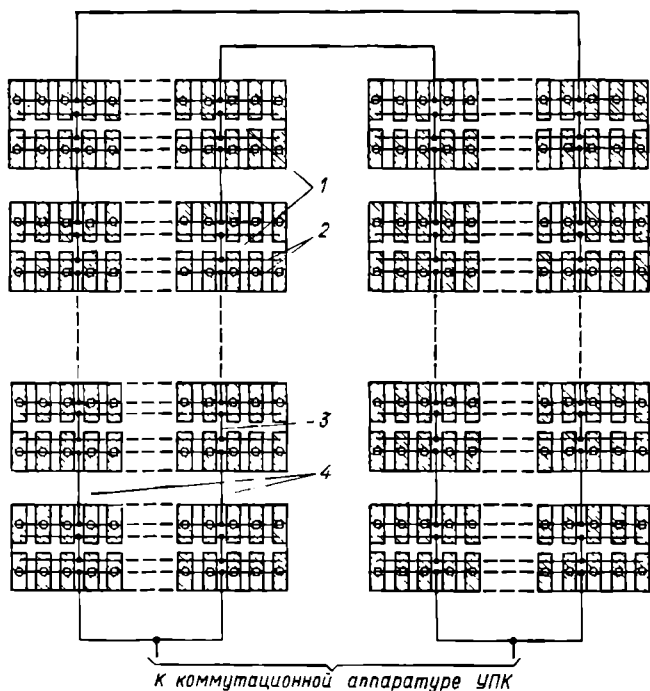


Рис. VIII.10. Схема соединения конденсаторов в одной фазе УПК:

1 — блоки конденсаторов; 2 — шины, соединяющие конденсаторы параллельно; 3 — шины, соединяющие корпуса конденсаторов; 4 — шины, соединяющие блоки конденсаторов последовательно

Для схем УПК, предусматривающих использование в качестве разделительного трансформатора вольтодобавочный трансформатор, коэффициент трансформации —  $k_{рт}$  определяется величиной тока, которую допускает переключатель ступеней, так как в данной схеме по конденсаторной батарее и контактам переключателя протекает один и тот же ток. Для трансформаторов, создаваемых Московским электрозаводом, этот ток обычно не должен превосходить 600 А.

Для схем УПК, использующих специальный разделительный трансформатор для выбора величины  $k_{рт}$ , определяющим является напряжение с высшей стороны этого трансформатора, которое должно соответствовать стандартному значению напряжения.

При этом коэффициент трансформации такого транс-



форматора может быть рассчитан по следующей формуле:

$$k_{p.r} = \frac{U_{1p.r}}{U_{2p.r}} = \frac{U_{1p.r} I_{amax}}{k_{сх} Q_{сф}}, \quad (\text{VIII.28})$$

где  $U_{1p.r}$ ,  $U_{2p.r}$  — первичное и вторичное напряжение разделительного трансформатора.

## 8. Пример расчета параметров электропечного контура и конденсаторной батареи УПК печи РКЗ-80к

Исходные данные:

Мощность трансформаторного агрегата  $S=80$  МВ·А, напряжение высшей стороны  $U_{в.н}=110$  кВ; схема соединения обмоток — треугольник — треугольник на электродах; естественное реактивное сопротивление фазы печной установки  $x_y=1,15$  мОм; производимый продукт — карбид кальция; печь трехэлектродная закрытая с круглой ванной; оптимальное значение коэффициента мощности в рабочем режиме  $\cos \varphi_0=0,92$ . Для конденсаторной батареи УПК используются конденсаторы типа КСПК-1,05-120 с номинальными параметрами  $Q_N=120$  квар,  $U_N=1050$  В,  $I_N=114,2$  А,  $x_N=9,2$  Ом.

Выбор параметров трансформаторного агрегата.

Исходя из сетевой мощности  $P_c = S \cdot \cos \varphi_0 = 80 \cdot 10^6 \cdot 0,92 = 73,6$  МВт [формула (VIII.16)],  $c=0,55$ ;  $r_y=0,08$  мОм и  $\lambda=0,33$  находится средний ток в электроде печи  $I_{э.ср}=154$  кА, обеспечивающий работу с УПК. Среднее рабочее напряжение (линейное) холостого хода трансформатора  $U_{ср} = S / \sqrt{3} I_{э.ср} = 80 \cdot 10^6 / \sqrt{3} \cdot 154 \cdot 10^3 = 300$  В. Согласно выражению (VIII.18)  $U_{max}=1,1 U_{ср}=1,1 \cdot 300=330$  В,  $U_{min}=0,9 U_{ср}=0,9 \cdot 300=270$  В. С учетом обеспечения технологического режима при изменении качества сырья для трансформатора принимаем диапазон изменения напряжений 340—290—140 В и фазных токов 78529—92069—92069 А (линейные токи 135855—159279—158279 А) с количеством ступеней регулирования напряжения 27 по 8,3 В на ступень. Коэффициент трансформации вольтодобавочного трансформатора принят равным  $k_{p.r}=154$ , что обеспечивает максимальный ток в цепи регулировочной обмотки  $I_{p.o}=92069/154=597$  А и максимальное напряжение холостого хода вольтодобавочной обмотки  $(340-140) \times \times 154/2=15400$  В.

Расчет параметров конденсаторной батареи УПК

По выражению (VIII.22)  $Q_{б.ср}=3(154 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,15 \cdot 10^{-3} - 80 \cdot 10^6 \times \times 0,393=50,38$  Мвар, максимальная рабочая мощность (8—23)  $Q_{б.max}=1,034^2 \cdot 50,38=53,86$  Мвар, где  $k_N=159279/154000=1,034$ .

Мощность конденсаторной батареи УПК на фазу составит  $Q_{ф.п.х}=53,86/3=17,95$  Мвар.

Число параллельно включенных конденсаторов определяется по формуле (VIII.26)

$$n_{пар} = \frac{159279}{154 \sqrt{3 \cdot 0,9 \cdot 114,2}} \approx 6 \text{ шт.}$$

Рабочая мощность одного конденсатора находится по формуле (VIII.26)

$$Q_{pN} = 120 \cdot 10^3 \left( \frac{159279}{154 \sqrt{3 \cdot 114,2 \cdot 6}} \right)^2 = 91,14 \text{ квар.}$$

Число последовательно включенных конденсаторов находится из выражения (VIII.26)

$$n_{\text{посл}} = \frac{17,95 \cdot 10^6}{6 \cdot 91,14 \cdot 10^3} \approx 33 \text{ шт.}$$

Количество конденсаторов на фазу  $n_{\Phi} = 6 \cdot 33 = 198$  шт.

Установленная мощность конденсаторной батареи на печь  $Q_{\text{б.у}} = 120 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 198 = 71,28$  Мвар.

Емкостное сопротивление одной фазы конденсаторной батареи  $x_c = 9,2 \frac{33}{6} = 50,6$  Ом.

Емкостное сопротивление на стороне низшего напряжения, приведенное к эквивалентной звезде  $x'_c = \frac{50,6}{3 \cdot 154^2} = 0,71$  Ом.

Реактивное сопротивление печи с учетом компенсации  $x_p = 1,15 - 0,71 = 0,44$  мОм.

Максимальное рабочее напряжение на конденсаторной батарее ставит  $U_{c\text{max}} = 597 \cdot 50,6 = 30\,208$  В.

Максимальное рабочее напряжение на одном конденсаторе  $U_{pH} = 30208/33 = 915,4$  В.

Определение параметров электрических цепей печи с УПК.

Расчет электрических характеристик выполнен при работе печи с УПК на 6 ступени регулирования напряжения трансформатора с параметрами:  $U_{нн} = 298,3$  В,  $I_{нн} = 89\,507$  А,  $I_a = 154\,847$  А,  $I_{po} = 580$  А,  $U_{po} = 58,3$  В,  $U_{A1X1} = 8978$  В.

Электрические характеристики определяются по методике, изложенной в соответствующих главах

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi_k = \sqrt{1 - \left( \frac{154847 \sqrt{3}}{298,3} 0,44 \cdot 10^{-3} \right)^2} = 0,9196,$$

$\sin \varphi_k = 0,393$ . Потребляемая активная мощность  $P_c = 80 \cdot 0,9196 = 73,568$  МВт, потери активной мощности  $P_{\text{пот}} = 3(154\,847)^2 \cdot 0,08 \times 10^{-3} = 5,755$  МВт, полезная мощность  $P_{\text{пол}} = 73,568 - 5,755 = 67,813$  МВт, коэффициент полезного действия  $\eta = 67,813/73,568 = 0,9218$ , полезное напряжение на электроде  $U_{\text{пол}} = 298,3 \cdot 0,9196 \times 0,9218 / \sqrt{3} = 146,2$  В, напряжение на конденсаторной батарее  $U_c = 580 \cdot 50,6 = 29\,348$  В. Напряжение на вольтодобавочной обмотке с высшей стороны с учетом УПК определяется из выражения (VIII.20)

$$U_{A2X2} = \sqrt{8,978^2 + 2 \cdot 8,978 \cdot 29,348 \cdot 0,393 + 29,348^2} = 33,897 \text{ кВ.}$$

Напряжение на выводах низшего напряжения трансформатора оборудованного УПК, находится из выражения (VIII.19), принимая  $r_T = 0,02$  мОм и  $x_T = 0,14$  мОм.

$$U_{п.у} = \sqrt{3} \cdot 154847 \times \\ \times \sqrt{[(1,02 - 0,02) 10^{-3}]^2 + [(1,15 - 0,14) 10^{-3}]^2} = 381,2 \text{ В.}$$

Относительная величина увеличения напряжения, получаемая при включении УПК, по расчету с учетом падения напряжения в трансформаторе  $\Delta U = \frac{(381,2 - 298,3)100}{298,3} = 27,8 \%$  по номограмме рис. VIII.8 без учета последнего фактора при  $\operatorname{ctg} \varphi_e = \frac{1,02}{1,15} = 0,887$  и  $k = \frac{0,44}{1,15} = 0,383$ ,  $\Delta U = 28 \%$ .

Аналогичные расчеты, проведенные для 1-й ступени трансформатора, показали, что максимальное рабочее напряжение обмотки среднего напряжения вольтодобавочного трансформатора составит 33,92 кВ.

1. *Смелянский М. Я., Бортничук Н. И.* Короткие сети электрических печей. М.: Госэнергоиздат, 1962. 91 с.
2. А.с. 3674122 (СССР)/Жилов Г. М., Черенкова И. М., Дресей В. В. и др. Оpubл. в Б.И., 1984, № 24.
3. *Нежурич В. И., Кравченко В. А., Стебянко Н. А.* и др. — Сб.: Электротермия, 1983, № 10.
4. *Сидоров А. Н.* Разработка рациональных схем и конструкций вторичных токопроводов ферросплавных печей: Автореф. кайд. дис., М., 1983.
5. *Данцис Я. Б., Жилов Г. М.* Искусственная компенсация реактивной мощности электропечей. — Л.: Энергия, 1971. 79 с.
6. *Гутман М. Б., Кацевич Л. С., Лейканд М. С.* и др. Электрические печи сопротивления и дуговые печи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
7. *Бойченко В. И., Дзекцер Н. Н.* Контактные соединения токоведущих шин. Л.: Энергия, 1979. 144 с.
8. *Окороков Н. В.* Дуговые сталеплавильные печи. М.: Metallurgy, 1971. 340 с.
9. *Аврух В. С., Митрофанов Н. Н.* — Промышленная энергетика, 1965, № 1, с. 29—32.
10. Правила устройства электроустановок. Раздел VII. Электрооборудование специальных установок. М.: Энергоатомиздат, 1980. 104 с.
11. *Марков Н. А.* Электрические цепи дуговых электропечных установок. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1963. 231 с.
12. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий М.: Энергия, 1981. 624 с.
13. Выбор уставок релейной защиты мощных электропечных трансформаторов/Под ред. Жилова Г. М., Симонова Ю. Ф. Методические указания, Ленингипрохим, 1973. 45 с.
14. *Митрофанов Н. Н.* Методика исследования вибраций шинных пакетов коротких сетей руднотермических печей. М. — Абразны, 1968, вып. 3.
15. *Цейтлин Л. А.* Индуктивность контуров и проводов. — Л.: Госэнергоиздат, 1950. 225 с.
16. *Струнский Б. М.* Короткие сети электрических печей. М.: Metallurgy, 1962. 335 с.
17. *Данцис Я. Б.* Методы электротехнических расчетов руднотермических печей. Л.: Энергия, 1973. 188 с.
18. *Хаинсон А. В., Трейвас В. Г., Пирогов Н. А.* Автоматизация расчета вторичного токопровода дуговых электропечей. — Сб. Электротермия, 1977, вып. 5.
19. *Хаинсон А. В., Трейвас В. Г., Пирогов Н. А.* Математическое моделирование вторичного токопровода дуговых электропечей. — Электротехника, 1979, № 11.
20. *Калантаров П. А., Цейтлин Л. А.* Расчет индуктивностей. Л.: Энергия, 1970. 415 с.
21. *Нейман Л. Р., Демирчян К. С.* Теоретические основы электротехники. Том II. М. — Л.: Энергия, 1966. 407 с.
22. *Янке Е., Эмде Ф.* Специальные функции. М.: Наука, 1964. 344 с.
23. *Данцис Я. Б.* Методы электротехнических расчетов мощных электропечей. — Л.: Энергоатомиздат, 1982. 230 с.
24. *Данцис Я. Б., Черенкова И. М., Кольчатова В. А.* — Электротехника, 1966, № 7.

25. Данцис Я. Б., Черенкова И. М. Таблицы и нормали для расчета реактивного сопротивления трубчатых и шинных пакетов коротких сетей руднотермических печей. Л.: Ленингипрохим, 1968. 62 с.
26. Пирогов Н. А. Расчет на ЭВМ индуктивного сопротивления вторичных токопроводов дуговых сталеплавильных печей. — Труды ВНИИЭТО, 1979, № 10.
27. Валькова З. А. Моделирование ванны руднотермических печей. Л.: Труды Ленингипрохима, 1971, вып. IV.
28. Жилов Г. М., Валькова З. А., Миронов Ю. М. и др. Исследование поля плотности мощности ванны фосфорной печи. Л.: Труды Ленингипрохима, 1983.
29. Игнатов И. И., Давыдов В. П. — Электротехника, 1985, № 2.
30. Кияницина М. С., Попова В. Ф. Потери в ферромагнитных конструкциях мощных токопроводов. Л., Энергия, 1972. 112 с.
31. Данцис Я. Б., Жилов Г. М. и др. Электротермические процессы химической технологии. — Л.: Химия, 1984. 463 с.
32. Семчинов А. М. Токопроводы промышленных предприятий. М. — Л.: Энергоатомиздат, 1982. 200 с.
33. Справочник по электроизмерительным приборам. 3-е изд. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 784 с.
34. Вострокнутов И. Г. Электрические счетчики и их эксплуатация. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1952. — 120 с.
35. Жилов Г. М., Федосеев А. Д., Яшков З. В. Прибор для измерения активной и реактивной составляющих сопротивления ванны фосфорной электропечи. — Фосфорная промышленность, 1976, № 11.
36. Смелянский М. Я., Дершварц Г. В. — Электричество, 1951, № 10.
37. Данцис Я. Б., Жилов Г. М. Емкостная компенсация реактивных нагрузок мощных токоприемников промышленных предприятий. — Л.: Энергия, 1980.
38. Ольшванг М. В., Ананишвили К. Е., Коровин А. И. и др. Статические тиристорные компенсаторы для сетей электроснабжения мощных дуговых печей. — Труды VIII Всесоюзного научно-технического совещания. Чебоксары, 1985.
39. Инструктивные материалы Главгосэнергонадзора. Раздел 5-й. Компенсация реактивной мощности. М.: Энергоатомиздат, 1983.